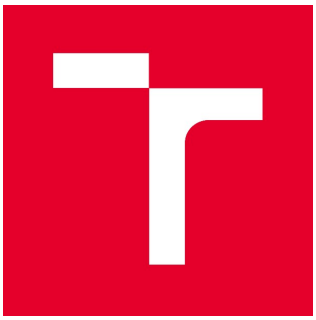


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Ing. Martin Němeček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. MILOŠ KALOUSEK, Ph.D.

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	P3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia
Studijní obor	3608V001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Student	Ing. Martin Němeček
Název	Vliv vnitřní tepelné akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu
Vedoucí práce	doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D.
Datum zadání	
Datum odevzdání	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání disertační práce

V Brně dne

prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D.
Vedoucí disertační práce

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 přinášejí 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 přehřívat dřevostavba o zhruba 0,5 °C více. Větší rozdíly v dosažených teplotách se pak projevují u velmi lehkých dřevostaveb bez žádné vnitřní tepelně akumulační hmoty. Tyto stavební konstrukce by proto v interiéru měli být vybaveny malým, racionálním, množstvím tepelně akumulační hmoty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vnitřní tepelná akumulace stavby, vnitřní tepelně 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.

ABSTRACT

In recent years we may observe a growth in construction of passive houses and low energy houses using lightweight constructions such as modern wooden houses. It is assumed that wooden houses keep overheating more comparing to brick houses during summer period. Due to the lack of research in this field the paper investigates the influence of internal thermal storage mass in passive houses' constructions on their summer thermal stability under the Czech climatic conditions. Only sensible heat accumulation without a usage of phase change materials is examined. Differences between wooden houses comparing to brick-built houses are emphasized. Objects of research are mostly residential passive houses in low energy building standards. However, the results of research might be applied to different types of buildings as well. The first section outlines theoretical fundamentals. For the research itself various scientific research methods were used, such as basic mathematical calculations, experimental temperature measurement of two buildings (detached house in Dubňany and in Moravany) and numerical simulations. Own tribute to the research was first of all discussion on the topic of thermal accumulation and structures' heat capacity calculation. Experimental measurements outlined conclusive evidence about the importance of internal thermal storage mass in respect of interior summer overheating. The research confirmed that the highest interior temperature reached is mostly

influenced by solar gains through unshaded windows. However, the influence of internal thermal storage mass is not remote. If we compare standard timber-framed wooden house to the hole ceramic bricks-built house, the wooden house will overheat by 0,5 °C more during a standard day. Wider spread in the maximum temperature reached was measured for lightweight consturctions' wooden houses without any internal thermal storage mass. Therefore, such structures should have an additional layer of thermal storage mass.

KEYWORDS

Internal thermal storage mass of construction, internal thermal storage mass, summer thermal stability, passive house, modern wooden house, heavyweight construction, lightweight construction, sensible heat storage, passive cooling, construction heat capacity, room heat capacity, building overheating, numerical simulation, DesignBuilder, BSim, quasi-stationary simulation, periodic penetration depth.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Martin Němeček *Vliv vnitřní tepelné akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu.* Brno, 2018. 179 s., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 1. 3. 2018

Ing. Martin Němeček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych velmi poděkovat panu doc. Ing. Miloši Kalouskovi, Ph.D. za odborné a trpělivé vedení této práce. Taktéž panu docentovi děkuji za poskytnutí jeho pasivní stavby k účelům dlouhodobého měření v rámci disertační práce. Děkuji také dalším stavebníkům, kteří mi umožnili měřit jejich objekty. Poděkování patří taktéž Ing. Josefu Pláškovi, Ph.D. za ochotu při konzultaci simulačního programu BSim a Ing. Janu Staškovi v případě programu DesignBuilder a DEKSOFT KOMFORT. Speciální poděkování patří Ing. Ivě Kasperové za četné konzultace programů Microsoft Word a Excel.

Obsah

A Úvod 5
B Současný stav problematiky 7
B.1 Energetická náročnost a pasivní domy 7
B.1.1 Energetická náročnost staveb 7
B.1.2 Pasivní dům a tepelné zisky 8
B.2 Moderní sendvičové dřevostavby 9
B.3 Lehké a těžké konstrukce a stavby 10
B.4 Klimatické podmínky České republiky 11
B.5 Tepelná stabilita místnosti a požadavky 12
B.5.1 Tepelná stabilita místnosti 12
B.5.2 Letní tepelná stabilita – požadavky 12
B.5.3 Letní tepelná stabilita – hodnocení 13
B.5.4 Letní tepelná stabilita – hodnocení vs. skutečnost 15
B.5.5 Noční větrání a provozní perioda domu 17
B.5.6 Zimní tepelná stabilita – požadavky 17
B.5.7 Letní tepelná stabilita – další požadavky a hodnocení 18
B.6 Faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu 18
B.7 Teplota jako ukazatel tepelné pohody 19
B.7.1 Tepelná pohoda 19
B.7.2 Měření tepelné pohody a vztahy teplot 20
B.8 Fyzikální základy 21
B.8.1 Šíření tepla 21
B.8.2 Hlavní tepelně technické vlastnosti materiálů 22
B.9 Tepelná akumulace stavby 24
B.9.1 Úvod do tepelné akumulace 24
B.9.2 Druhy tepelné akumulace 24
B.9.3 Objemová tepelná kapacita 26
B.9.4 Objemová tepelná kapacity c_V běžných stavebních materiálů 27
C Cíle práce 30
D Použité postupy a předpoklady práce 31
E Úvodní simulace a měření 33
E.1 Výpočetní program SIMULACE – výpočet dle ČSN 730540-2 33
E.1.1 Popis programu SIMULACE 2009 33
E.1.2 Kvazistacionární stav a metoda výpočtu 34
E.2 Simulace letní tepelné stability bytu dle ČSN 730540 – SIMULACE 35

E.2.1 Cíl simulace ... 35
E.2.2 Popis simulace ... 35
E.2.3 Konstrukční varianty ... 36
E.2.4 Větrání, výplně otvorů a stínění ... 41
E.2.5 Výsledky ... 42
E.2.6 Závěr simulace ... 46
E.3 Výpočetní program BSim ... 48
E.3.1 Popis programu BSim ... 48
E.3.2 Principy výpočtů v BSim ... 48
E.3.3 Prostředí programu BSim ... 49
E.3.4 Vytváření modelu a výpočet ... 51
E.3.5 Rezervy simulace v programu BSim ... 52
E.4 Pasivní dřevostavba RD Dubňany ... 54
E.5 Srovnávací simulace letní tepelné stability – SIMULACE vs. BSim – dle ČSN 730540 ... 58
E.5.1 Cíl srovnávací simulace ... 58
E.5.2 Posuzovaný objekt ... 58
E.5.3 Konstrukční varianty ... 59
E.5.4 Popis kvazistacionární simulace ... 61
E.5.5 Výsledky ... 63
E.5.6 Diskuze rozdílů mezi SIMULACÍ a BSim ... 67
E.5.7 Závěr srovnání SIMULACE vs. BSim ... 69
E.5.8 Výsledky srovnání konstrukčních variant v BSim ... 70
E.5.9 Výsledky dlouhodobé simulace konstrukčních variant v BSim ... 71
E.5.10 Závěr srovnání konstrukčních variant v BSim ... 74
E.6 Měření letní tepelné stability pasivního RD Dubňany a simulace v BSim ... 75
E.6.1 Cíl měření a simulace ... 75
E.6.2 Popis měření ... 75
E.6.3 Výsledky ... 78
E.6.4 Závěr z měření ... 80
E.6.5 Popis srovnávací simulace ... 81
E.6.6 Výsledky srovnávací simulace ... 82
E.6.7 Závěr srovnávací simulace ... 83
E.6.8 Popis simulace konstrukčních variant ... 83
E.6.9 Výsledky simulace konstrukčních variant ... 84
E.6.10 Závěr simulace konstrukčních variant ... 85
E.7 Simulace faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu ... 86

E.7.1 Cíl simulace ... 86
E.7.2 Popis simulace ... 86
E.7.3 Výsledky ... 87
E.7.4 Závěr simulace faktorů ... 89
E.8 Měření zimní tepelné stability RD Dubňany a simulace v BSim ... 91
E.8.1 Cíl měření a simulace ... 91
E.8.2 Popis měření ... 91
E.8.3 Výsledky měření a srovnávací simulace ... 92
E.8.4 Závěr ... 94
F Tepelná akumulace – pokračování ... 95
F.1 Vnitřní tepelná akumulace pasivních domů – základní princip ... 95
F.2 Periodická penetrační hloubka δ a plošná tepelná kapacita κ ... 95
F.3 Plošná tepelná kapacita κ – zjednodušená metoda (*metoda δ*) ... 96
F.4 Plošná tepelná kapacita κ – metoda efektivní tloušťky ... 97
F.5 Plošná tepelná kapacita κ – zjedn. metoda s odporem při přestupu tepla (*metoda δ+R+Rs*) ... 97
F.6 Plošná tepelná kapacita κ – přesná metoda pro vícevrstvé konstrukce (*metoda matice Z*) ... 98
F.7 Odpor při přestupu tepla R_s ... 98
F.8 Plošná tepelná kapacita κ běžných stavebních materiálů ... 99
F.9 Srovnání plošné tepelné kapacity κ běžných stavebních materiálů ... 102
F.10 Celková tepelná kapacita místnosti C_m a $C_{m,V}$ ... 103
G Hlavní simulace a měření ... 104
G.1 Simulace konstrukčních variant RD Dubňany v BSim ... 104
G.1.1 Cíl simulace ... 104
G.1.2 Popis simulace ... 104
G.1.3 Konstrukční varianty ... 105
G.1.4 Tepelná kapacita místnosti ... 111
G.1.5 Výsledky ... 112
G.1.6 Závěr ... 113
G.2 Výpočetní program DesignBuilder ... 115
G.2.1 Popis výpočetního programu Design Builder ... 115
G.3 Dlouhodobé měření letní tepelné stability dvojdomu RD Moravany a simulace v DesignBuilder ... 117
G.3.1 Cíl měření a simulace ... 117
G.3.2 Stavba RD Moravany ... 117
G.3.3 Popis měření ... 119
G.3.4 Výsledky měření ... 121

G.3.5 Závěr z měření ... 125
G.3.6 Popis srovnávací simulace ... 128
G.3.7 Výsledky srovnávací simulace ... 129
G.3.8 Závěr srovnávací simulace ... 132
G.4 Dlouhodobá simulace konstrukčních variant RD Moravany v DesignBuilder 133
G.4.1 Cíl dlouhodobé simulace ... 133
G.4.2 Popis simulace ... 133
G.4.3 Konstrukční varianty ... 134
G.4.4 Tepelná kapacita místnosti ... 140
G.4.5 Výsledky ... 141
G.4.6 Závěr ... 143
G.5 Srovnání programů KOMFORT a SIMULACE – kvazistacionární výpočet dle ČSN 730540 ... 145
G.6 Tepelná bilance místnosti ... 147
H Dotazník na letní tepelnou stabilitu ... 149
I Možnosti dalšího výzkumu ... 151
J Závěr ... 152
J.1 Přístup k hodnocení, diskuze ... 152
J.2 Obecné hodnocení ... 154
J.2.1 Absolutní hodnocení – faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu ... 154
J.2.2 Absolutní hodnocení – vliv vnitřní tepelně akumulační hmoty ... 156
J.2.3 Relativní hodnocení – vliv vnitřní teplně akumulační hmoty ... 160
J.3 Zodpovězení cílů práce ... 161
K Seznam publikací a projektů autora ... 164
L Seznam použitých zdrojů ... 166
M Seznam použitých zkratek a symbolů ... 170
N Seznam použitých veličin ... 171

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 [1]. Od roku 2021 by totiž všechny budovy měly mít „téměř nulovou spotřebu energie“. Tento koncept se stavebně prakticky velmi blíží pasivnímu konceptu. Koncept pasivního domu byl již od roku 1990 vyvíjen v Passive House Institutu v německém Darmstadtu. 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. Právě proto se také pojí s konceptem pasivního domu, ale nejenom s ním, požadavky na letní tepelnou stabilitu a prevenci přehřívání stavby, ideálně bez strojního chlazení. Jmenovaná Směrnice Evropského parlamentu a Rady upozorňuje na problematiku zvyšování spotřeby energie na chlazení a doporučuje se soustředit na systémy pasivního chlazení bez použití chlazení strojního.

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. Již z podstaty neobsahují tyto stavby větší množství masivní hmoty, jako je tomu například u staveb zděných. Přesto mají současné dřevostavby jiné další výhody a dá se předpokládat jejich zvyšující se podíl na stavebním trhu. 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 tepelně akumulační hmoty se tedy nabízí laická otázka: „Přehřívá se v létě pasivní dřevostavba podstatně více než pasivní stavba zděná?“ Tato práce se proto zabývá vlivem vnitřní tepelné akumulace konstrukcí pasivních domů na jejich letní tepelnou stabilitu. Práce je z výše jmenovaných důvodů zaměřena zejména na problematiku vnitřní tepelné akumulace dřevostaveb v letním období ve srovnání se

stavbami zděnými. Zděná stavba je v současné době stále chápána jako stavba tradiční, dřevostavba jako nový konstrukční systém. Parametry současných zděných staveb z lehčených tvárnic, nejenom v rovině tepelně akumulační, však nemusí s parametry původních materiálů jako cihla plná zcela korespondovat. Problematika tepelné akumulace pro letní období je v práci řešena obecně. Závěry práce se dají aplikovat i na jiné lehké konstrukční systémy, ale i na konstrukční systémy obecně.

Práce se dále zaměřuje na problematiku tzv. pasivního chlazení, to znamená na vytváření komfortního tepelného prostředí v letním období přirozenými možnostmi stavby [2]. Pasivní, možnosti chlazení jsou obecně uvažovány v podobě větrání stavby (zejména noční) a vnitřní tepelné akumulace stavby. Práce se zabývá přirozenou tepelnou akumulací citelného tepla vnitřními stavebními konstrukcemi bez použití PCM materiálů (Phase Change Material) pracujících také s latentním teplem. 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. Konstrukční skladby jsou tedy podmíněny tím, že mají poměrně značně vysoký tepelný odpor.

Jak již bylo řečeno, práce se snaží popsat, jaký vliv má na letní přehřívání stavby její vnitřní tepelně akumulační hmota. Srovnává, do jaké míry se přehřívá dřevostavba více oproti standardní stavbě zděné. Práce se také snaží porovnat jednotlivé stavební materiály a konstrukce s ohledem na jejich tepelnou akumulaci. Taktéž srovnává, jaký vliv má tepelně akumulační hmota oproti jiným faktorům ovlivňujících letní tepelnou stabilitu. Využívá k tomuto jak experimentální měření staveb, tak zejména podrobné simulace. Taktéž je v práci věnována pozornost samotnému popisu skutečné tepelně akumulační schopnosti místnosti, respektive stavby, s užitím teorie penetrační hloubky dle ČSN EN ISO 13786 [3]. 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 Energetická náročnost a pasivní domy

B.1.1 Energetická náročnost staveb

V Evropě již delší dobu postupně sílí tlak na čím dál nižší energetickou náročnost staveb. Má být řešen jak samotný stavební návrh objektu a jeho obálky ve vztahu k potřebě tepla na vytápění, tak i ostatní potřeby tepla na jeho provoz v podobě neobnovitelné primární energie. Jednou z odpovědí na tyto otázky byl koncept pasivního domu, který byl zhruba od roku 1990 vyvíjen v Passive House Institutu v německém Darmstadtu [4]. Tento koncept postupně sílil a v současnosti je v některých zemích jako např. Německo nebo Rakousko přijímán za standard. Taktéž v České republice novostavby v energeticky pasivním standardu tvoří již řadu let nezanedbatelnou část celkové obytné výstavby. ČSN 730540 definuje pasivní dům jako budovu s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění E_A, nepřekračující v případě rodinných domů 20 kWh/(m^2·a) [5], splňující současně soubor dalších požadavků a podmínek hodnocení [6] [7]. Německý Passive House Institut a jeho metodika PHPP je již přísnější. Měrná potřeba tepla na vytápění má být nižší než 15 kWh/(m^2·a) [8]. Taktéž energeticky vztažná plocha se počítá z vnitřních rozměrů stavby, v České republice je to z rozměrů vnějších. Výsledný německý pasivní dům má pak poměrně značně nižší potřebu tepla na vytápění E_A než pasivní dům český.

Důležitým mezníkem je také směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU EPBD II [1] z roku 2010 o energetické náročnosti budov, která mění původní směrnici EPBD I. Od roku 2021 by totiž všechny budovy měly mít „téměř nulovou spotřebu energie“ [9]. Tento koncept se stavebně prakticky velmi blíží pasivnímu konceptu.

Vedle pasivního domu nebo budovy s téměř nulovou spotřebou energie existuje vícero energetických konceptů. Patří mezi ně například aktivní dům, energeticky úsporný dům, nízkoenergetický dům, energeticky nulový nebo plusový dům, energeticky nezávislý nebo ostrovní dům. Většina konceptů je s mírnými odchylkami obdobná, každopádně pasivní dům je z hlediska stavební obálky a její tepelně izolační schopnosti nejdále [9].

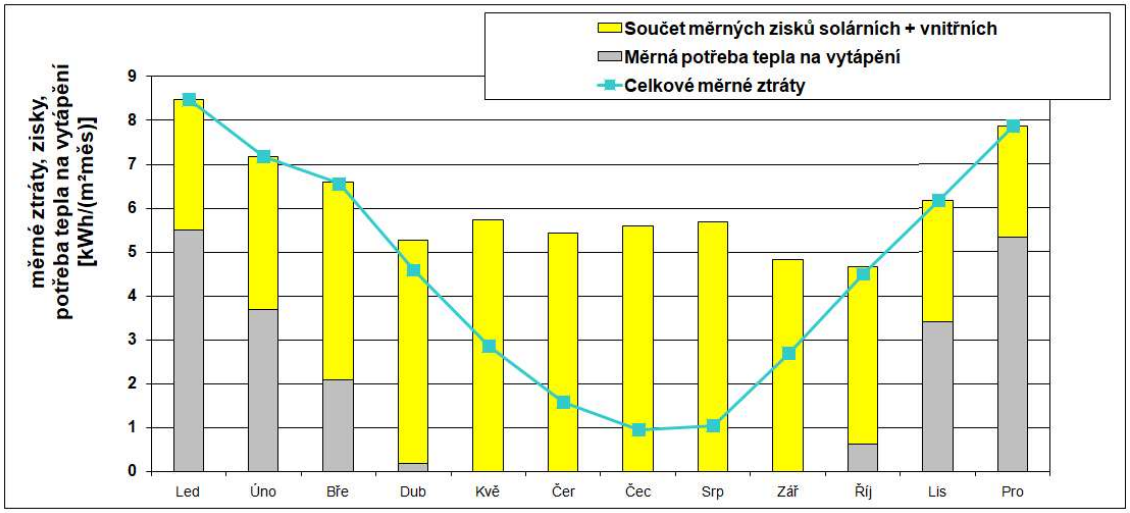
Dalším požadavkem na pasivní stavbu je taktéž vnitřní teplota vzduchu v letním období. Letní tepelná stabilita by měla být v ideálním případě řešena tak, aby nebylo potřeba strojního chlazení, které podstatně zvyšuje spotřebu energie. Kupříkladu jmenovaná Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov z roku 2010 II [1] upozorňuje na problematiku zvyšování spotřeby energie na chlazení a doporučuje se soustředit na systémy pasivního chlazení bez použití chlazení strojního. To samé doporučení platí v rámci normy ČSN 730540-2 [5].

B.1.2 Pasivní dům a tepelné zisky

Energeticky pasivní stavby mají velmi malou potřebu tepla na vytápění E_A [10]. Pro dosažení tak malé potřeby tepla je vhodné, aby pasivní domy přijímaly co nejvíce slunečních tepelných zisků okny. Proto mají tyto stavby obytné místnosti a jejich okna orientovány zejména na JV, J a JZ (Obr. 1) [11]. Navíc jsou tato okna oproti starší zástavbě o mnoho větší, což odpovídá i požadavkům německé metodiky PHPP [8]. Dnešní architektura si větší prosklené části fasády a kontakt s přírodou taktéž žádá.

Obr. 1 Pasivní dům s velkými okny orientovanými k jihu

Obr. 2 Typická moderní dřevostavba s lehkým dřevěným skeletem



Graf 1 Bilance potřeby tepla na vytápění E_A pasivního domu (součet cca 20 kWh/(m²·a))

Graf 1 zobrazuje po měsících měrnou potřebu tepla na vytápění E_A dle metodiky PHPP pasivního RD Hrubá Vrbka (Obr. 1) s výsledkem cca 20 kWh/(m²·a). Lze pozorovat, že sluneční a vnitřní zisky podstatně snižují potřebu tepla na vytápění a zkracují topnou sezónu na zhruba 5 měsíců, obecně i méně.

Z pohledu letní tepelné stability je tedy rozdíl energeticky pasivních staveb oproti konvenčním stavbám takový, že mají více slunečních tepelných zisků [12]. Pokud nejsou v létě okna stíněna, může tato nadbytečná tepelná zátěž znamenat větší potíže s přehříváním, než je u standardních staveb zvykem [13].

B.2 Moderní sendvičové dřevostavby

V poslední době se v České republice, nejen s rozmachem pasivního stavitelství, začalo uplatňovat větší množství konstrukčních systémů staveb. Patří mezi ně jak masivní a zděné systémy, tak konstrukce na bázi lehkého dřevěného skeletu. Nejpočetnějším zástupcem lehkých stavebních systémů jsou moderní sendvičové dřevostavby, které používají jako nosnou konstrukci nejčastěji lehký dřevěný skelet (Obr. 2). Nejenom pro nízkoenergetickou výstavbu mají dřevostavby určité výhody. Lehké sendvičové části stavby mohou být připraveny s předstihem mimo stavební pozemek, realizace se řídí principem suché výstavby. Proto může být doba výstavby velmi krátká. Avšak již z podstaty neobsahují tyto stavby větší množství masivní hmoty, jako je tomu například u staveb zděných. Jakákoliv další snaha o zvýšení tepelné akumulace vnášením mokrých

procesů v podobě vyzdívek a omítek vede k částečné degradaci výhod původního principu rychlé a suché výstavby těchto montovaných staveb.

Okrajovou odnoží těchto staveb jsou ekologické dřevostavby, které používají materiály často na přírodní bázi. Mimo tepelné izolace na bázi dřeva nebo slámy často využívají hliněné omítky, hliněné panely nebo vyzdívky. Tyto stavby nemají za cíl racionální a rychlou výstavbu, ale spíše environmentální přístup. Přesto však nemusí tyto stavby a jednotlivé stavební materiály spadat do kategorie alternativní. V současné době již není výjimečné vybavit dřevostavbu vnitřním obložením z hliněného panelu nebo hliněnou omítkou. Všechny tyto úpravy razantně zvyšují tepelnou akumulaci stavby. Výjimečně se také setkáme s pojmem akumulační dřevostavba, která v sobě opět uplatňuje masivní prvky, buďto v podobě hliněných prvků nebo standardní zděné technologie nebo mokrých procesů s použitím silikátových výrobků.

B.3 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 [5].

Ukázkovým zástupcem „lehké“ stavby složené z lehkých konstrukcí je zmiňovaná současná moderní sendvičová dřevostavba. Naproti tomu tradičním zástupcem „těžké“ stavby je objekt vyzděný z plných pálených cihel. Konstrukce z masivních cihel v současnosti nahrazují lehčené tvárnice s nižší objemovou hmotností na úkor jejich tepelně akumulační schopnosti.

V tabulce (Tabulka 1) lze vidět, že i zděná konstrukce může být lehká s nízkou tepelnou akumulací a dřevostavba naopak s těžkou konstrukcí. Proto je důležité nepředjímat a automaticky nezaměňovat u staveb a konstrukcí pojmy „zděný“ a „masivní“ – „těžký“ – „s vysokou tepelnou akumulací“. Ve výpočtu je zanedbán vliv tepelné akumulace hlavní izolace. Taktéž je velmi důležité konstatovat, že masivní konstrukce, které jsou od interiéru odděleny tepelnou izolací, byť v malé tloušťce, nelze častokrát považovat za vyloženě těžké. Míra jejich schopnosti podílet se na tepelné akumulaci může být značně snížena. Může se jednat o železobetonové desky základů pod

systémovými polystyrenovými deskami podlahového vytápění nebo železobetonové stropy, pod nimiž je umístěn sádrokartonový podhled oddělený vzduchovou vrstvou působící v podstatě jako slabší tepelná izolace.

Konstrukce stěny	Současná sendvičová dřevostavba	Současná sendvičová dřevostavba akumulační	Pórobetonové zdivo	Zdivo z cihel plných pálených
Vrstvy na straně interiéru	SDK deska 12,5 mm 750 kg/m^3 OSB deska 18 mm 630 kg/m^3 Hlavní tepelná izolace	Hliněný panel s hl. omítkou 50 mm 1800 kg/m^3 OSB deska 18 mm 630 kg/m^3 Hlavní tepelná izolace	Pórobeton 300 mm 300 kg/m^3 Omítka 5 mm 1800 kg/m^3 Hlavní tepelná izolace	CPP 300 mm 1800 kg/m^3 Omítka 15 mm 1800 kg/m^3 Hlavní tepelná izolace
Plošná hmotnost vrstev [kg/m^2]	21	101	99	567
Zatřídění konstrukce	Lehká konstrukce	Těžká konstrukce	Lehká konstrukce	Těžká konstrukce

Tabulka 1 Porovnání hmotnosti resp. tepelné setrvačnosti konstrukcí dle normy ČSN 730540-2

B.4 Klimatické podmínky České republiky

Česká republika leží ve Střední Evropě a je charakterizována kontinentálním klimatem. Léta jsou velmi teplá a slunečná. Zimy jsou chladné a oblačné s menším množstvím sněhových srážek. Průměrná roční teplota vzduchu se pohybuje pro většinu ČR v rozmezí 5 až 9 °C. Nejchladnějších měsícem roku je leden s průměrnou teplotou vzduchu zhruba -3 °C. Délka otopného období je rovna 9 měsícům. Nejteplejšími měsíci roku jsou červen, červenec a srpen, kdy se pohybuje průměrná teplota vzduchu okolo +20 °C [14]. Denní maxima v těchto měsících se pohybují často nad +30 °C. Nejvyšší úhrny přímého slunečního svitu v letním období jsou okolo 280 hodin v měsíci červnu. Globální sluneční záření J_M v poledne při bezoblačné obloze dosahuje výše 800 – 1000 W/m^2.

B.5 Tepelná stabilita místnosti a požadavky

B.5.1 Tepelná stabilita místnosti

Tepelná stabilita charakterizuje teplotní vlastnosti prostoru tvořeného stavebními konstrukcemi ve vztahu k vnějším podmínkám. Místnost se dá označit za tepelně stabilní, pokud její tepelný stav zůstává v daném časovém intervalu v dovolených mezích [15].

Na obálku budovy působí neustále se měnící vnější prostředí zejména v podobě venkovní teploty vzduchu a slunečního záření. Danému objektu či místnosti je tímto tepelná energie buď dodávána nebo odebírána. Pokud není v tomto prostoru nijak upravováno vnitřní prostředí, může se nadměrně přehřívat nebo vychládat. V trvale obydlených budovách nejsou takovéto stavy většinou přijatelné. Typickými případy jsou zimní vychládání místnosti při noční otopné přestávce nebo letní přehřívání místnosti např. vlivem nadměrných slunečních zisků. Hodnocení místnosti z hlediska tepelné stability se dle normy ČSN 730540–2 provádí zvlášť pro zimní a letní období na základě neustáleného teplotního stavu [5].

B.5.2 Letní tepelná stabilita – požadavky

Návrh dobré tepelné stability obytného objektu by měl zajistit, aby se daný objekt nebo jeho jednotlivá místnost v letním období nepřehřívala. Požadavek na letní tepelnou stabilitu stanovuje norma ČSN 730540-2 [5]. Hlavním hodnotícím kritériem je nejvyšší denní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ v kritické místnosti. Norma stanovuje pro obytné resp. nevýrobní budovy tento požadavek:

$$\theta_{ai,max} \leq 27\ °C$$

Norma doplňuje, že u obytných budov je možné překročit požadovanou hodnotu o nejvíce 2 °C na souvislou dobu nejvíce 2 hodiny, pakliže s tímto souhlasí stavebník nebo uživatel. Kromě toho se u budov se strojním chlazením připouští nejvyšší hodnota $\theta_{ai,max} \leq 32$ °C bez uvažování chlazení. Kritickou místností se rozumí místnost s největší plochou přímo osluněných výplní otvorů orientovaných na Z, JZ, J, JV a V.

Norma ČSN 730540-2 [5] taktéž upozorňuje na problematiku letní tepelné stability u budov s rozsáhlými prosklenými plochami. Je zde potřeba optimalizace prosklených ploch, návrh stínicích prostředků, tepelně akumulující hmoty a režim větrání. Upozorňuje, že ke strojnímu chlazení by se mělo upínat až po vyčerpání „přirozených“

stavebních možností. Dále konstatuje, že u budov s lehkými obvodovými plášti je zpravidla možné jejich nižší tepelně akumulační schopnosti kompenzovat kombinací jejich nižšího prostupu tepla s hmotným akumulačním jádrem budovy. Tepelně akumulační vrstvy musí být přivráceny k danému prostoru a nesmí být od nich odstíněny izolačními vrstvami (podhledy, tepelné izolace aj.). Takovéto řešení by mělo být zejména u rozsáhlejších objektů posouzeno podrobnou simulací ve vazbě na vytápění a větrání.

B.5.3 Letní tepelná stabilita – hodnocení

Samotné prokázání požadavků na letní tepelnou stabilitu má být podle normy ČSN 730540–4 [16] ověřováno výpočtovými postupy dle ČSN EN ISO 13791 [17] a ČSN EN ISO 13792 [18] při použití okrajových podmínek podle ČSN 730540–3 [19]. Výpočet letní tepelné stability probíhá za podmínek neustáleného teplotního stavu. Posuzovaná místnost je vystavena periodicky se opakujícímu tepelnému zatížení v podobě vnější teploty vzduchu θ_e a globálního slunečního záření J_M. Časová perioda je rovna 24 hodinám [18]. Výpočet se dle normy ČSN 730540 [16] provádí pro 21. srpen a pro 52,0 stupňů zeměpisné šířky. Denní průběh venkovní teploty θ_e a hodnoty intenzity globálního slunečního záření J_M stanovuje tabulka H8 (Tabulka 2) v normě ČSN 730540-3 [19]. Pro ilustraci, nejnižší venkovní teplota θ_e je 16 °C ve 3 hodiny ráno, nejvyšší teplota je 30 °C ve 3 hodiny odpoledne. Provoz místnosti je v podstatě určen pouze intenzitou výměny vzduchu v místnosti n (Tabulka 3). Hodnocení se totiž provádí bez uvažování vnitřních tepelných zisků v místnosti. Výpočet a hodnocení předpokládá dosažení tzv. kvazistacionárního tepelného stavu – stav charakterizovaný dlouhodobě se opakujícími nestacionárními denními okrajovými podmínkami [16]. Pro výpočet se uvažuje celkové globální sluneční záření, které je definováno pro různě orientované plochy J_M.

Čas (h)	Návrhová teplota vzduchu v letním období θ_e* (°C)	Intenzita Globálního Slunečního Záření Pro Jednotlivé Orientace J_M W/m^2								
		I,S	I,J	I,V	I,Z	I,H	I,JV	I,JZ	I,SV	I,SZ
1	16.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	16.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	16.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	16.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	16.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	18.1	67	37	265	37	92	178	37	219	37
7	19.5	69	103	549	69	248	432	69	384	69
8	21.2	95	259	656	95	415	608	95	376	95
9	23.0	116	420	637	116	567	699	116	270	116
10	24.8	132	553	526	132	687	708	151	132	132
11	26.5	142	640	353	142	764	644	345	142	142
12	27.9	145	670	145	145	790	516	516	145	145
13	29.1	142	640	142	353	764	345	644	142	142
14	29.8	132	553	132	526	687	151	708	132	132
15	30.0	116	420	116	637	567	116	699	116	270
16	29.8	95	259	95	656	415	95	608	95	376
17	29.1	69	103	69	549	248	69	432	69	384
18	28.0	67	37	37	265	92	37	178	37	219
19	26.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	24.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	23.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	21.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	18.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 2 Teplota venkovního vzduchu θ_e a globálního slunečního záření J_M dle ČSN 730540-3 [19]

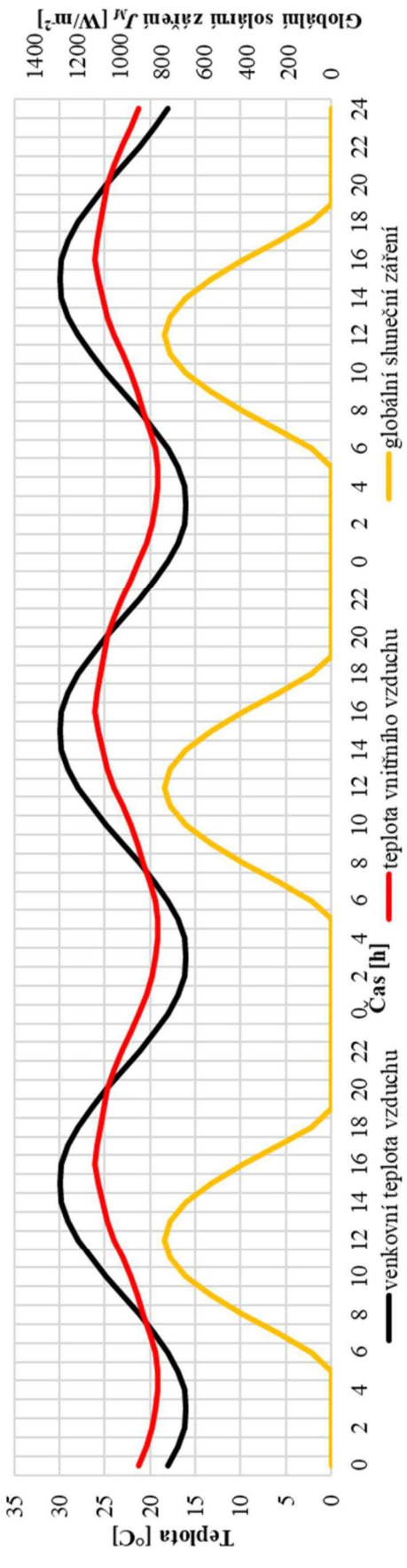
Okna jen na jedné straně fasády	
Výměna vzduchu v místnosti n (h^{-1})	Způsob větrání okny v celodenním průběhu [1)]
1,5 po celý den	Okna otevřena trvale ve dne i v noci z 50 %
0,5 přes den a 2,5 přes noc	Okna jsou otevřena přes noc z 50% a z 10 % přes den (otevřené ventilační křídlo)
Okna pro sobě, na protilehlých stranách fasády (příčné větrání)	
4,0 po celý den	Okna otevřena trvale ve dne i v noci z 50 %
2,0 přes den a 7,5 přes noc	Okna jsou otevřena přes noc z 50% a z 10 % přes den (otevřené ventilační křídlo)
[1)] Noc se uvažuje od 21 hodin do 9 hodin včetně.	

Tabulka 3 Výměna vzduchu v místnosti n dle ČSN 730540-3 [19]

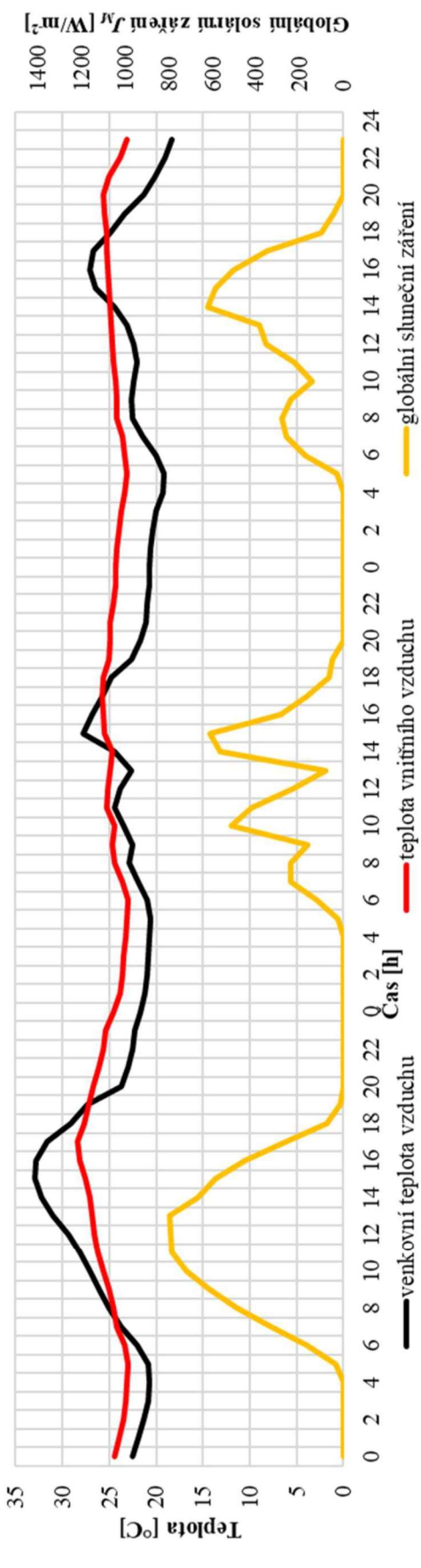
B.5.4 Letní tepelná stabilita – hodnocení vs. skutečnost

Klimatická zátěž místnosti stanovená normou ČSN 730540-3 [19] je idealizovaným stavem, který se nekonečně opakuje za sebou (tj. kvazistacionární tepelný stav). Průběh teploty a slunečního záření přes den nedosahuje zcela nejvyšších hodnot, které v létě v ČR nastávají. Na druhou stranu místnost je těmito podmínkami zatěžována každý den.

Ve skutečnosti není průběh venkovní teploty a slunečního záření takto ideální. Každý den je totiž průběh obou hodnot, tzn. výše a dynamika změn, trochu odlišný. Rozdíl mezi idealizovaným stavem a skutečným chováním místnosti popisuje Graf 2 a Graf 3. Na stavbu a místnost působí ve skutečnosti každý den jiné klimatické podmínky. Stavba si navíc do dalšího dne nese vždy jiný tepelný stav vnitřní akumulační hmoty. Proto nemusí být zjednodušená metodika dle patřičných norem ČSN 730540 [20] a ČSN EN ISO 13791 [17] pro posuzování specifických vztahů jako je např. tepelně akumulační hmota a vnitřní teplota místnosti zcela ideální.



Graf 2 Letní tepelná stabilita podle ČSN 730540



Graf 3 Letní tepelná stabilita ve skutečnosti

B.5.5 Noční větrání a provozní perioda domu

Střídání dne a noci má zásadní vliv na provozní režim domu. V klimatických podmínkách České republiky se v létě pohybuje venkovní teplota vzduchu kolem 30 °C a výše, zatímco v noci klesá pod 20 °C, někdy až pod 15 °C (viz část B.5.4). Samozřejmostí tak je využít noční větrání pro odvod tepelných zisků z proběhlého dne a vychlazení domu na den následující [21] [22]. Tomuto přirozenému principu chlazení se říká pasivní chlazení [23]. Noční větrání je tak ve skutečnosti základním přirozeným prostředkem, kterého se obyčejně využívá pro snížení teploty interiéru stavby.

Pro užívání obytných staveb v létě se dá tedy stanovit veličina provozní perioda domu T, neboli perioda opakování. Ta popisuje kolísání venkovní, resp. vnitřní teploty vzduchu a je rovna 1 dni – 86 400 s. Skládá se z denní části s tepelnou zátěží a noční části s větráním [24].

B.5.6 Zimní tepelná stabilita – požadavky

Požadavek na zimní tepelnou stabilitu stanovuje norma ČSN 730540-2 [5]. Hlavním hodnotícím kritériem je pokles výsledné vnitřní teploty v kritické místnosti $\Delta\theta_{V(t)}$. Požadavek je stanoven pro místnosti s pobytem lidí po přerušení vytápění takto:

$\Delta\theta_{V(t)} \leq 3$ °C vytápění radiátory, sálavé panely, teplovzdušně

$\Delta\theta_{V(t)} \leq 4$ °C kamna, podlahové vytápění

Kritickou místností se rozumí místnost s nejvyšším průměrným součinitelem prostupu tepla konstrukcí místnosti U_m [5]. Často je to rohová místnost pod střechou. Výsledná doba poklesu teploty pak určí délku otopné přestávky.

B.5.7 Letní tepelná stabilita – další požadavky a hodnocení

Další méně známou normou popisující důležité parametry vnitřního prostředí je norma ČSN EN 15251 [25]. Tepelnou pohodu v letním období zde reprezentuje nejvyšší operativní teplota $\theta_{l\,max}$. Přípustné hodnoty jsou zde pro obytné budovy bez strojního chlazení netradičně určeny třemi odstupňovanými intervaly (1. interval +1 °C, až 3. interval +3 °C). Nejvyšší operativní teplota $\theta_{l\,max}$ v třetím, tzn. nejvíce benevolentním, intervalu je stanovena vzorcem:

$$\theta_{l\,max} = 0{,}33\ \theta_{rm} + 18{,}8 + 3 \qquad [°C] \qquad (1)$$

Veličina θ_{rm} značí průměrnou denní teplotu venkovního vzduchu vypočtenou váženým průměrem pro předcházející dny. Váha jednotlivých dnů však chronologicky vzad posupně klesá. Například s obvyklou hodnotou θ_{rm} rovnající se 25,5 °C může být nejvyšší operativní teplota $\theta_{l\,max}$ rovna až ~ 30,2 °C. Koncept normy totiž bere v úvahu dosažené teploty v předcházejících dnech. Tyto teploty samozřejmě reálně ovlivňují, respektive posunují hranice vnímání tepelné pohody.

B.6 Faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu

Pozornost letní tepelné stabilitě, přehřívání staveb nebo pasivnímu chlazení je v zahraniční odborné literatuře věnována pozornost již řadu let - [22] [26] [23] [27] a [28]. V České republice nemá studium této problematiky příliš dlouhou tradici. Mezi současné práce zabývající se touto problematikou můžeme řadit např. literaturu – [29] [30] [31] [32] [33]. Z této dostupné literatury je zřetelné, že na letní tepelnou stabilitu obytných staveb mají zejména vliv tyto faktory:

- tepelné zisky přes průsvitné části obálky budovy,
- tepelné zisky přes neprůsvitné části obálky budovy,
- větrání budovy,
- míra tepelně akumulační schopnosti objektu,
- vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů.

Tepelné zisky průsvitnými částmi budovy mohou být v podobě slunečních tepelných zisků přes okna (tepelné záření), ale také samotným prostupem tepla přes okna (tepelné vedení). Tepelné zisky neprůsvitnými částmi obálky jsou realizovány samotným

prostupem tepla. Větrání budovy může jak pozitivně, tak negativně ovlivnit vnitřní teplotu (viz část B.5.5). Hmota uvnitř stavby může akumulovat teplo a předejít jejímu přehřívání. Tepelné zisky od osob a spotřebičů mohou tepelně zatěžovat interiér stavby a zvyšovat vnitřní teplotu. Dostupná zahraniční literatura se věnuje a dává největší váhu zejména slunečním ziskům okny a možnosti nočního větrání. Tepelně akumulační hmota figuruje spíše v pozici sekundárního pomocníka při nočním větrání.

B.7 Teplota jako ukazatel tepelné pohody

B.7.1 Tepelná pohoda

Vnitřní mikroklima budov je spjato s termínem tepelná pohoda. Tepelná pohoda je pocit, který člověk vnímá při pobytu v daném prostředí. Přesnější definice tepelné pohody může vypadat následovně:

- Tepelná pohoda znamená, že je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není ani chladno, ani příliš teplo – člověk se cítí příjemně [34].
- Tepelná pohoda je stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení [35].
- Tepelná pohoda znamená stav, ve kterém největší procento osob ze skupiny udává pohodu prostředí [36].

Pro dosažení tepelné pohody musí mít lidský organismus vyrovnanou tepelnou bilanci [37]. Tu ovlivňují subjektivní a objektivní faktory. Mezi subjektivní faktory patří aktuální fyzický stav organismu (tělesná aktivita, věk, pohlaví, zdraví aj.), psychický stav organismu, ale i míra oblečení člověka. 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

Teplota vzduchu θ_{ai} je teplota interiérového vzduchu bez vlivu sálání z okolních povrchů [37].Střední radiační teplota θ_r je myšlená rovnoměrná společná teplota všech ploch v prostoru, při níž by byl přenos tepla z těla sáláním stejný, jako ve skutečnosti.

B.7.2 Měření tepelné pohody a vztahy teplot

Výsledná teplota objektivně působící na člověka v obytných stavbách je přinejmenším tvořena vnitřní teplotou vzduchu θ_{ai} a teplotou okolních povrchů θ_p, které na člověka tepelně sálají. Pro měření tepelné pohody se často používá kulový teploměr, který právě obě tyto veličiny bere v úvahu – teplota θ_g.

Další používanou veličinou je operativní teplota θ_o. Operativní teplota je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekcí i sáláním stejné množství tepla, jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí. Operativní teplota bere v úvahu teplotu vzduchu θ_{ai}, střední radiační teplotu θ_r a ještě navíc rychlost vzduchu v. Jestliže proudění vzduchu dosahuje malých hodnot (do ~ 0,2 m/s) a přitom střední radiační teplota je podobná teplotě vzduchu, je operativní teplota srovnatelná s teplotou, kterou naměří kulový teploměr [38].

Jelikož mají obalové konstrukce pasivního domu vysokou hodnotu tepelného odporu, dá se předpokládat, že venkovní teplota nebude příliš ovlivňovat jejich vnitřní povrch. Proto je možné, že vnitřní teplotní stav místnosti bude v celém objemu stejný a jednotlivé teploty vzduchu, radiační a povrchové teploty nebo operativní teploty, popř. teplota naměřená kulovým teploměrem budou srovnatelné.

B.8 Fyzikální základy

B.8.1 Šíření tepla

Šíření tepla se může uskutečnit několika způsoby [39] [40]:

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

Přenos tepla vedením

Jedná se o vzájemnou výměnu kinetické energie částicemi látky, které spolu sousedí. Podmínkou je existence látkového prostředí. Tepelný tok má směr vždy z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Rychlost vedení tepla určuje tepelnou vodivost materiálu. Matematicky vedení tepla definuje první Fourierův zákon.

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (2)$$

kde je:

q hustota tepelného toku vedením [W/m^2]
λ součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
Δt teplotní rozdíl desek [K]
Δx vzdálenost [m]

Přenos tepla prouděním

Jedná se o přenos způsobený pohybem tekutých látek (vzduch, voda). Proudící tekutina s sebou přenáší tepelnou energii. Podmínkou je existence látkového prostředí. Výměna tepla je popsána Newtonovým zákonem:

$$q_k = \alpha_k \cdot (t_1 - t_2) \quad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (3)$$

kde je:

q_k hustota tepelného toku prouděním [W/(m^2·K)]
α_k součinitel přestupu tepla při proudění [W/(m^2·K)]
t_1, t_2 teplota vzduchu a povrchu konstrukce nebo naopak [°C]

Přenos tepla zářením

Jedná se o přenos tepla elektromagnetickým zářením. Tento přenos nevyžaduje látkové prostředí. Přirozeným zdrojem je jakékoliv těleso nebo látka s teplotou vyšší, než je absolutní nula.

$$\frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_T}{Q} = 1 \qquad [\mathrm{W}] \qquad (4)$$

Nebo

$$R + A + T = 1 \qquad (5)$$

kde je:

Q	sálavý tok [W]
R	odrazivost, tj. podíl odraženého sálání a dopadajícího sálání,
A	pohltivost, podíl pohlceného sálání a dopadajícího sálání
T	propustnost, tj. podíl propuštěného sálání a dopadajícího sálání.

B.8.2 Hlavní tepelně technické vlastnosti materiálů

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost ρ znamená střední hustotu nespojitě v prostoru rozložené látky, např. pórovité, zpěněné nebo volně sypané [41]. Je to tedy hmotnost materiálu v definovaném stavu o objemu 1 m^3. Objemová hmotnost je definována vztahem:

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

kde je:

ρ	objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]
m	hmotnost materiálu [kg]
V	objem dané látky včetně pórů a mezer [m^3]

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita *c* vyjadřuje množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 kg materiálu při stálém tlaku a definované vlhkosti o 1 K [41]. Měrná tepelná kapacita je definována vztahem:

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

kde je:

c	měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]
E	tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J]
m	hmotnost materiálu [kg]
Δt	přírůstek teploty [K]

Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost je významným ukazatelem vlastností stavebních látek z hlediska stavební tepelné techniky. Vyjadřuje schopnost homogenního materiálu přenášet teplo vedením, je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti představuje tepelný tok ve wattech, který proudí 1 m^2 stěny o tloušťce 1 m při teplotním rozdílu protilehlých ploch 1 K [41].

Součinitel tepelné vodivost je dán vztahem:

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

kde je:

λ	součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
grad t	teplotní gradient [K/m]
q	hustota tepelného toku [W/m^2]

Množství tepla

Tepelnou energii lze uchovávat v kapalných, plynných i pevných látkách. Množství tepla *Q* přijatého látkou je přímo úměrné jeho hmotnosti *m*, měrné objemové kapacitě *c* a rozdílu počáteční a koncové teploty *Δt* [42], lze jej tedy definovat vztahem:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \qquad [\mathrm{J}] \qquad (9)$$

kde je:

Q množství tepla [J]

m hmotnost [kg]

c měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]

Δt rozdíl počáteční a koncové teploty [K]

B.9 Tepelná akumulace stavby

B.9.1 Úvod do tepelné akumulace

Termín „tepelná akumulace budovy“ popisuje problémy spojené s časově proměnlivým, neustáleným a nestacionárním průběhem teplot a tepelných toků v konstrukcích, místnostech a budovách [39]. Časová proměnlivost je v této problematice tepelné akumulace stěžejní. Jak bylo řečeno v části B.5.1 místnost může v zimě vlivem otopné přestávky nadměrně vychládat nebo se v létě nadměrně přehřívat vlivem slunečních zisků. Vnitřní tepelně akumulační hmota místnosti v podobě jejich konstrukcí může tyto nežádoucí stavy částečně omezit.

Literatura uvádí, že historicky se tato oblast v ČR dostala do povědomí až po I. světové válce s rozmachem výstavby lehkých budov [39]. Vytápění v klasických těžkých cihelných stavbách s vysokou tepelnou akumulací mohlo být provozováno s noční otopnou přestávkou. U lehkých staveb to již z hlediska tepelného komfortu kvůli nadměrnému nočnímu vychládání nebylo možné. Tehdejší pozornost se až do nedávné minulosti soustředila zejména na problematiku zimní tepelné stability. Hodnotila se především obvodová stěna a její vlastnosti s ohledem na tepelnou izolaci a tepelnou akumulaci ve vztahu k tepelné stabilitě místnosti [39].

B.9.2 Druhy tepelné akumulace

Tepelnou akumulaci lze z časového hlediska rozdělit na [43]:

- krátkodobou – nejvýše několik dní
- dlouhodobou – týdny až měsíce
- případně na sezónní – jeden rok

Za výše popsaných okrajových podmínek letní tepelné stability a skutečných provozních podmínek domů (viz část B.5.5) má na letní tepelnou stabilitu vliv zejména krátkodobá tepelná akumulace materiálu. Dlouhodobá složka tepelné akumulace je již sekundární.

Hlavními druhy akumulace tepelné energie z pohledu stavební fyziky u materiálů jsou akumulace [44] [45]:

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

Tepelná akumulace citelného tepla je nejběžnějším a nejrozšířenějším typem akumulace. Citelné teplo je přirozeně využíváno při akumulaci stavebními konstrukcemi budov, při akumulaci vody v zásobnících pro účely vytápění, anebo k sezónní akumulaci. V rámci standardní výstavby obytných budov představuje akumulace citelného tepla přirozenou cestu akumulace.

Naproti tomu materiály s akumulací latentního tepla mají o mnoho vyšší tepelnou kapacitu než materiály s akumulací pouze citelného tepla [46]. S vysokou schopností akumulace pak mohou PCM materiály oproti klasickým stavebním materiálům mnohem výrazněji omezit vzrůst teploty interiéru. Schopnost akumulace je tak velká, že pokud by nedocházelo k jejímu průběžnému vybíjení, tepelná kapacita se vyčerpá a naopak může zpětně dojít k velkému tepelnému zatížení místnosti vlivem vybíjení naakumulovaného PCM materiálu [31]. Jedinou jednoduchou možností vybíjení naakumulované energie přirozenou cestou je u obytných staveb pouze noční větrání. To obyčejně postačuje na vybíjení energie absorbované v klasických materiálech s akumulací citelného tepla. U PCM materiálů s poměrně větší absorbovanou energií lze hůře vyvětrat místnost klasickou výměnou vzduchu, které je při nočním větrání u obytných staveb obvykle dosahováno (3 - 5 h^{-1}) [31]. Nadměrně zvýšené větrání místností, pokud je vůbec realizovatelné, může znamenat také určitý diskomfort. Proto musí být u PCM materiálů pro využití jejich plného potencionálu zvoleno spíše aktivnějšího přístupu při odvodu tepla z domu [31] [47]. U administrativních budov se například osvědčilo použití nočního větrání vzduchotechnikou za zvýšených výměn vzduchu. Taktéž použití kapilárních rohoží zabudovaných například v omítce s příměsí PCM materiálů anebo akumulační

PCM vrstvy v konstrukcích aktivované řízeně větranými mezerami jsou aktuálním tématem.

Tato práce se zaměřuje pouze na přirozenou tepelnou akumulaci citelného tepla uloženého v samotné konstrukci domu a jeho stavebních materiálech.

B.9.3 Objemová tepelná kapacita

Základními veličinami s ohledem na tepelnou akumulaci materiálu je objemová hmotnost ρ a měrná tepelná kapacita c (viz část B.8.2) [26]. Ani jedna z těchto veličin však nedokáže sama o sobě plnohodnotně informovat o výsledné tepelné akumulaci daného materiálu. Avšak součinem obou těchto veličin vzniká veličina objemová tepelná kapacita c_v, která již vyjadřuje absolutní schopnost materiálu absorbovat teplo. Materiály je pak jednodušší mezi sebou porovnat.

Objemová tepelná kapacita

Objemová tepelná kapacita c_v vyjadřuje množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 m^3 daného materiálu při stálém tlaku a definované vlhkosti o 1 K. Objemová tepelná kapacita je definována vztahem:

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

kde je:

- c_V objemová tepelná kapacita [J/(m^3·K)]
- ρ objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]
- c měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]

B.9.4 Objemová tepelná kapacity cv běžných stavebních materiálů

Tabulka 4 uvádí základní stavební materiály a jejich dílčí vlastnosti dotýkající se tepelné akumulace – ρ, c, c_V. Nejvyšší objemovou tepelnou kapacitu c_V má z těchto materiálů jednoznačně železobeton (dále také ŽB) a beton s 2,45 respektive 2,35 MJ/(m^3·K). Tradiční zdivo z cihel plných pálených (dále také CPP) má c_V rovno 1,62 MJ/(m^3·K), což je oproti železobetonu podstatně méně. V současnosti stále více oblíbenější vápenopískové tvárnice (dále také VPC) mají podle objemové hmotnosti c_V mezi 1,4 až 2,0 MJ/(m^3·K), jsou tedy nejblíže tradičnímu zdivu z CPP. Keramické dutinové tvárnice se pohybují již níže v rozmezí 0,65 až 0,83 MJ/(m^3·K). Pórobetonové tvárnice mají hodnoty ještě nižší, od 0,3 až po 0,5 MJ/(m^3·K).

Podle rozsahu výše uvedených hodnot je tedy patrné, že i u zděných staveb existuje značný rozdíl v schopnosti daného materiálu akumulovat teplo. Nelze tedy zaměňovat zděnou těžkou stěnu, např. z cihel CPP, s poměrně lehčí stěnou např. z pórobetonového nebo keramického dutinového zdiva. Materiál zdiva CPP má například oproti superizolačnímu pórobetonu teoreticky více než 5x vyšší schopnost tepelné akumulace.

Přechodovou skupinu mezi zděnými stavbami a lehkými stavbami tvoří dřevostavby z CLT panelů, které mají nezanedbatelnou tloušťku a c_v materiálu rovno 0,78 MJ/(m^3·K). Tato hodnota je srovnatelná s keramickým nebo pórobetonovým zdivem.

MATERIÁL	Objemová hmotnost ρ [kg/m^3]	Měrná tepelná kapacita c [J/(kg·K)]	Objemová tepelná kapacita c_V [MJ/(m^3·K)]
Masivní stavby			
Železobeton	2 400	1 020	2,45
Cihla plná pálená na maltu	1 800	900	1,62
Vápenopískové tvárnice	2 000	1 000	2,00
Vápenopískové tvárnice - nižší obj. hmotnost	1 400	1 000	1,40
Keramické dutinové tvárnice - vyšší obj. hmotnost	825	1 000	0,83
Keramické dutinové tvárnice	650	1 000	0,65
Pórobetonové tvárnice	500	1 000	0,50
Pórobetonové tvárnice superizolační	300	1 000	0,30
VC omítka	1 800	850	1,53
Lehké sendvičové stavby			
Měkké dřevo	400	2 510	1,00
CLT panel	490	1 600	0,78
Sádrokartonová deska	750	1 060	0,80
OSB deska	630	1 580	1,00
Hliněný panel	1 500	1 100	1,65
Ekopanel (panel ze slámy)	379	1 700	0,64
Podlahy			
Betonová mazanina	2 300	1 020	2,35
Litý anhydrit	2 100	850	1,79
Sádrovláknitá deska	1 175	1 050	1,23
Tepelné izolace			
Foukaná celulóza	50	2 000	0,10
Dřevovláknitá izolace měkká	45	2 100	0,09
Dřevovláknitá izolace tuhá	250	2 100	0,53
Polystyrenová izolace	15	1 270	0,02
Minerální izolace tuhá	160	800	0,13
Minerální izolace měkká	20	860	0,02
Vzduch	1	1 010	0,00
Ostatní			
Voda 20°C	998	4 200	4,19

Tabulka 4 Objemová tepelná kapacita c_V běžných stavebních materiálů

Lehké sendvičové dřevostavby mají své vnitřní opláštění většinou složené z deskového materiálu. Sádrokartonová deska (dále také SDK) a OSB deska dosahují hodnot c_V 0,8 resp. 1,0 MJ/(m^3·K). Nad tyto deskové materiály vyčnívá sádrovláknitá deska (dále také SVL) 1,23 MJ/(m^3·K) a ještě více hliněný systémový panel 1,65 MJ/(m^3·K).

Podlahy jsou u zděných staveb nebo dřevostaveb prováděny obdobnými technologiemi. Avšak je pravdou, že u zděných staveb je více tendence využít spíše mokrých systémů – tzn. beton popř. anhydrit. Samotný anhydrit je ve srovnání se zmíněným betonem na tom hůře, c_V je rovno 1,79 MJ/(m^3·K).

Tepelné izolace ve srovnání s hutnějšími stavebními materiály mají velmi malou objemovou tepelnou kapacitu pohybující se okolo 0,02 až nejvýše 0,1 MJ/(m^3·K). Jejich vliv na vnitřní tepelnou akumulaci je velmi malý. Naproti tomu pro srovnání samotná voda má nejvyšší objemovou tepelnou kapacitu ze všech uvedených materiálů 4,19 MJ/(m^3·K). Samozřejmě, že voda není užívána ke stavebním účelům. Naopak je ale ideální látkou k akumulaci tepla v technických systémech vytápění staveb a přípravy teplé vody.

Z výsledků tabulky (Tabulka 4) je patrné, že nejlepším běžným stavebním materiálem v rámci tepelné akumulace je železobeton, dále pak hmotné zdící prvky jako cihly CPP nebo VPC tvárnice. Novodobé izolační tvárnice dosahují oproti tradiční cihle CPP již podstatně nižších hodnot. Deskové materiály dřevostaveb jako OSB, SDK nebo SVL desky dosahují taktéž nižších hodnot, navíc mají velmi malou tloušťku a tudíž i nízkou celkovou tepelnou akumulaci. Tepelné izolace mají zanedbatelnou schopnost tepelné akumulace. Pro případné cílené zvýšení tepelné akumulace dřevostaveb je vhodné použití materiálů o vysoké objemové tepelné kapacitě a rozumné tloušťce. Jejich zabudování by mělo být takové, aby byly v přímém styku s interiérem místnosti. Může jít např. o zdvojené opláštění stěn SDK deskami, hliněnými panely popř. omítkami, nebo o betonové popř. anhydritové potěry umístěné v podlahách.

C Cíle práce

V současném stavu problematiky je rozveden vztah letní tepelné stability k pasivním domům a dřevostavbám. Pasivní domy mohou mít skrze větší okna orientovaná na V až Z vyšší tepelnou zátěž v létě. Vnitřní tepelně akumulační hmota je jedním z faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu. Absence této akumulační hmoty u dřevostaveb oproti zděným stavbám tedy může znamenat snížení komfortu v létě nebo zvýšení potřeby tepla na chlazení. Na druhou stranu je patrné, že i v samotných zděných stavbách je velký rozptyl v jejich skutečné vnitřní tepelné akumulaci.

V rámci práce byly vytyčeny tyto cíle a otázky:

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

Doplňující otázky:

1.1. S ohledem na hlavní otázku stanovit rozdíl mezi dřevostavbami a zděnými stavbami.

1.2. Jaké jsou rozdíly pro konstrukční systémy v otázce 1.1. v období s velmi teplými dny, které trvají zhruba 1 – 3 dny, nebo delší období – cca týden.

1.3. V případě, že vliv vnitřní tepelné akumulace je podstatný, jak s tímto faktem postupovat při návrhu stavby.

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

Zejména výpočty tepelné kapacity konstrukcí a místnosti. V práci je věnována pozornost samotnému popisu skutečné tepelně akumulační schopnosti místnosti, respektive stavby, s užitím teorie penetrační hloubky.

2. Experimentální měření staveb

Bylo měřeno vícero pasivních objektů v rámci letní tepelné stability. Bylo provedeno taktéž jedno měření zimní tepelné stability. Měření byla krátkodobá i dlouhodobá. Experimentální měření se soustředila hlavně na situace přehřívání místnosti vlivem nezastíněných oken. Práce obsahuje měření pouze dvou objektů, které pro ni byly nejpřínosnější – RD Dubňany a RD Moravany.

3. Srovnávací simulace

Je uplatňován princip verifikace experimentálního měření samotnou simulací. Po měření objektu je posléze vytvořena srovnávací simulace, která slouží pro ověření věrohodnosti modelu, popřípadě pro kalibraci modelu na reálné chování objektu při měření. Po srovnávací simulaci je přistoupeno k variantní simulaci, která hodnotí především tepelně akumulační hmotu objektu.

4. Variantní simulace

Simulace jsou většinou provedeny variantně tak, aby postihly zejména vliv vnitřní tepelně akumulační hmoty, popřípadě ostatních faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu.

5. Nadstavba současného stavu problematiky

Při vytváření práce vznikla potřeba popsat, rozvést nebo vytvořit další atributy dotýkající se dané problematiky. Jedná se například o penetrační hloubku nebo vliv přestupu tepla u tepelné akumulace konstrukcí.

Těchto několik přístupů bylo použito pro co nejvíce komplexní pohled na danou problematiku. Přístupy jsou v práci často individuální. Například měřený objekt, jeho stav, možnosti, limity měření a ochota stavebníka, předurčovaly samotnou kvalitu

a kvantitu naměřených dat. To dále ovlivňovalo provedení samotných srovnávacích i dalších simulací. V práci byly voleny takové postupy, aby z dané situace bylo možno vytěžit kvalitní a relevantní informace k dané problematice.

Řešení problematiky bylo založeno na experimentu a zejména numerické simulaci bez komplikovanějších analytických řešení. Práce taktéž předpokládá, že letní tepelnou stabilitu pasivních domů ovlivňuje tepelná zátěž přes venkovní neprůsvitné konstrukce jen velmi málo. Součinitel prostupu tepla U obalových konstrukcí pasivních domů je natolik nízký, že stěnou prochází velmi málo tepla. Tím klesá vliv donedávna frekventovaných parametrů konstrukce jako je např. fázový posun, teplotní útlum nebo relaxační doba a roste potřeba popsat samotnou tepelně akumulační schopnost konstrukce na straně přivrácené k interiéru.

Při analytických výpočtech nebo simulacích bylo dle vhodnosti využito několika výpočetních programů – SIMULACE – Svoboda Software, BSim, Design Builder, KOMFORT DEKsoft, tabulkový software Excel.

V simulacích a značení jednotlivých konstrukčních variant byly použity tyto zkratky:

L – předpoklad lehké stavby (lehká sendvičová dřevostavba)

M – předpoklad těžké stavby (keramické a pórobetonové tvárnice)

H – předpoklad velmi těžké stavby (vápenopískové tvárnice, ŽB monolit)

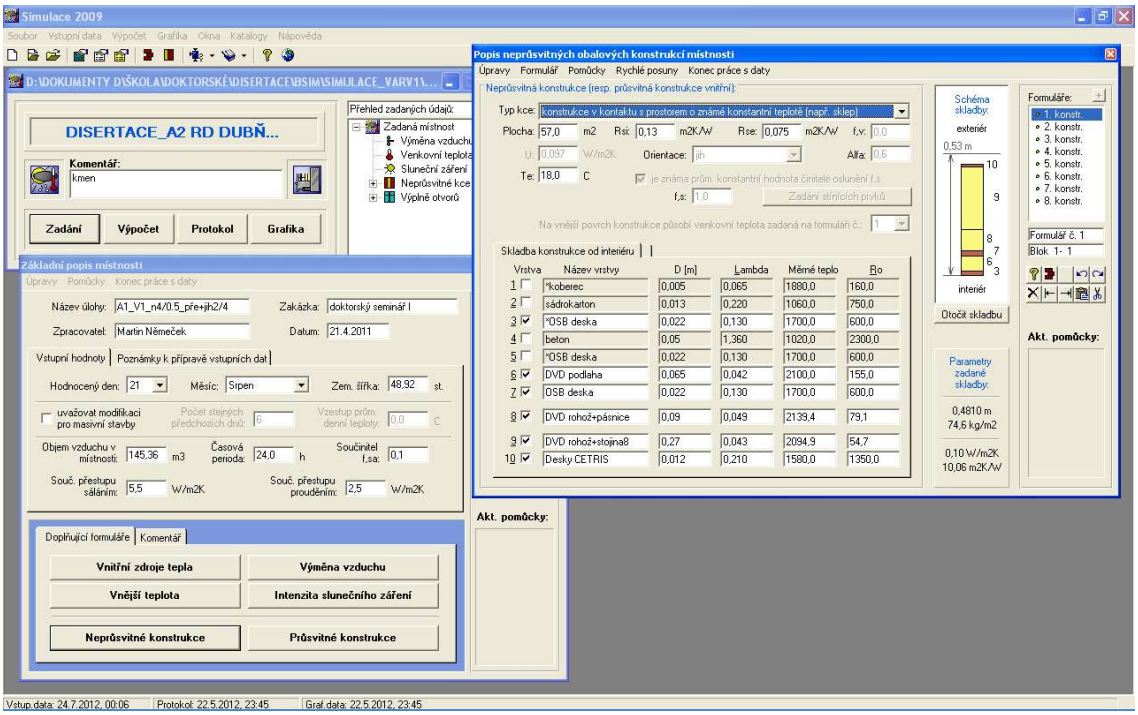
Provedené simulace jsou často řešeny s různou mírou nočního větrání místností – tzn. výměna vzduchu v nočních hodinách (vysvětlení viz B.5.5). Větrání přes den je většinou realizováno naopak v co nejnižší možné míře. V grafech a popisu výsledků jsou pro zjednodušení uváděny jenom noční výměny vzduchu (např. 2, 4, 6 h^{-1}). Dále byly simulace často prováděny ve dvou variantách stínění oken. První varianta s takovým stíněním, aby bylo dosaženo komfortní teploty, se nazývá varianta stínění. Druhá varianta, kdy jsou okna stíněna minimálně, se nazývá varianta přehřívání.

E Úvodní simulace a měření

E.1 Výpočetní program SIMULACE – výpočet dle ČSN 730540-2

E.1.1 Popis programu SIMULACE 2009

Program SIMULACE 2009 provádí hodnocení dynamické odezvy místnosti na tepelnou zátěž v letním období podle ČSN EN ISO 13791 [17] a ČSN EN ISO 13792 [18]. Program tak vyhodnocuje místnost z hlediska požadavků na tepelnou stabilitu v letním období dle ČSN 730540-2 [5]. Výsledkem je časový průběh teploty vnitřního vzduchu θ_{ai}, střední radiační teploty θ_r a operativní teploty θ_o v interiéru během zvoleného letního dne. Výpočet může zohledňovat také časově proměnné větrání místnosti, její vnitřní zisky, také stínění obalových konstrukcí i oken.



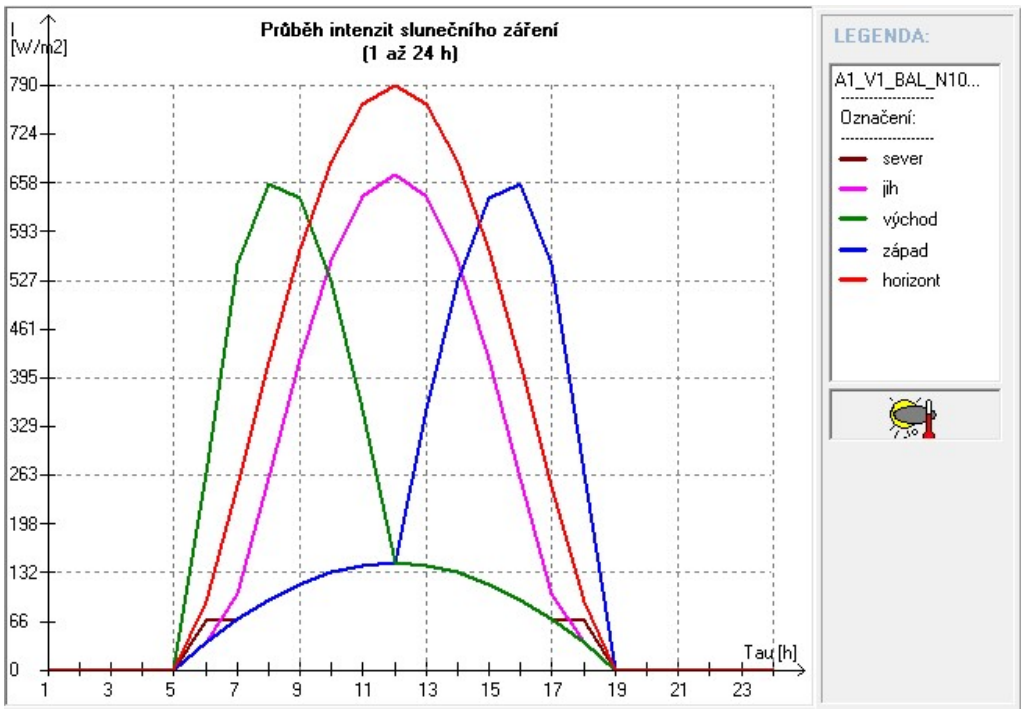
Obr. 3 Prostředí programu SIMULACE 2009

Do programu se dosazují hodnoty pro intenzitu slunečního záření, výměnu vzduchu, vnitřní tepelné zisky, venkovní teplotu, dále pak popis průsvitných a neprůsvitných konstrukcí. Plochy konstrukcí jsou většinou zadávány z vnitřních rozměrů.

E.1.2 Kvazistacionární stav a metoda výpočtu

Program může zpracovat vstupní data pomocí dvou výpočetních metod. První je metoda tepelné jímavosti, která spadá do 2. třídy – střední přesnost výpočtu. Druhá metoda je metoda R-C, která spadá do 1. třídy – nejvyšší přesnost výpočtu. Obě metody a i samotné posuzování dle ČSN EN ISO 13791 resp. ČSN EN ISO 13792 a ČSN 730540- 2 se v SIMULACI hodnotí na základě předpokladu dosažení tzv. kvazistacionárního stavu. Tento pojem, zjednodušeně řečeno, znamená, že uvažované teploty v exteriéru trvají tak dlouho, že už si na ně libovolná obalová konstrukce "zvykne". Je to tedy ustálený stav v konstrukci pro předpoklad trvale se opakující nestacionární okrajové podmínky (také viz část B.5.3). Tento stav je poté základem pro výpočet tepelných zisků.

Výpočet odezvy místnosti na tepelnou zátěž v letním období R-C metodou vychází z ČSN EN ISO 13792 [18], příloha A.2. Jedná se o tříbodový model založený na analogii mezi elektrickým obvodem a místností. Vliv rychlosti dosažení kvazistacionárního stavu nebyl do modulu R-C metody zahrnut. Všechny výsledky získané R-C metodou tedy představují chování místností po dosažení kvazistacionárního stavu.



Graf 4 Globální sluneční záření J_M v programu SIMULACE

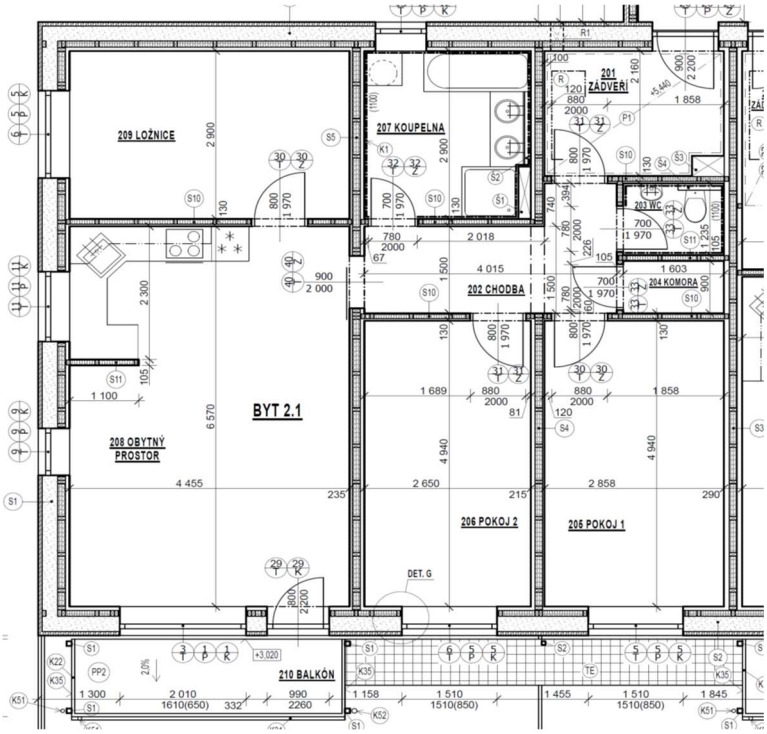
E.2 Simulace letní tepelné stability bytu dle ČSN 730540 – SIMULACE

E.2.1 Cíl simulace

Cílem této simulace je srovnat nejvyšší dosaženou denní teplotu vzduchu $\theta_{ai,max}$ dle ČSN 730540-2 u 1 bytu pasivního bytového domu v různých konstrukčních řešení. Jsou voleny lehké i těžké stavební systémy s různými tepelně akumulačními vlastnostmi. Hodnocení předpokládá simulaci dle ČSN 730540 s dosažením kvazistacionárního stavu (viz část B.5.4). Závěrem by mělo být srovnání chování všech použitých konstrukčních variant a zhodnocení, do jaké míry ovlivňuje vnitřní tepelně akumulační hmota objektu nejvyšší teplotu v referenční místnosti.

E.2.2 Popis simulace

K výpočtům byl použit program SIMULACE 2009 z balíčku STAVEBNÍ FYZIKA (Svoboda Software). Pro simulaci byl použit objekt bytového domu z autorovy diplomové práce [48]. Referenční místností byla zvolena kritická místnost z hlediska letního přehřívání, tedy obytný prostor 208 bytu 2.1 orientovaný na jih a západ. Místnost je umístěna ve 2. patře, okna jsou umístěna jak v jižní, tak v západní stěně (Obr. 4 a Obr. 5).



Obr. 4 Půdorys bytu 2.1 (posuzovaná kritická místnosti – 208 Obytný prostor)

Obr. 5 Vizualizace bytového domu (posuzovaný byt – 2.NP vlevo)

Podlahová plocha místnosti činí 29,3 m^2, podíl plochy výplní otvorů k podlahové ploše je 1 / 4. Protože se tento podíl obvykle u klasických nepasivních staveb pohybuje okolo 1 / 10 až 1 / 5. Dá se říci, že míra prosklení místnosti je nadstandardní. Dům je větrán nuceně vzduchotechnikou s rekuperací vzduchu. Plochy obalových konstrukcí místnosti jsou: vnější stěna - 22,5 m^2; podlaha a strop 29,3 m^2; vnitřní stěna 15,3 m^2 a příčka 9,9 m^2. Plochy jsou stanovené z vnitřních rozměrů, výplně otvorů jsou odečteny. Objem vzduchu místnosti je $V = 31{,}9\ m^3$. Odpory při přestupu tepla na vnitřní straně byly voleny (stěna / podlaha / strop) R_{si} = 0,13 / 0,17 / 0,10 $(m^2 \cdot K)/W$ a na vnější straně jednotně R_{se} = 0,075 $(m^2 \cdot K)/W$. Součinitel prostupu sáláním byl volen 5,5 $W/(m^2 \cdot K)$ a součinitel přestupu prouděním 2,5 $W/(m^2 \cdot K)$. Simulace probíhala ve dvou základních módech. Stíněná varianta, která vyhovuje požadavkům na vnitřní teplotu a přehřívané varianty, kde nejsou okna nijak stíněna.

E.2.3 Konstrukční varianty

Ve srovnávacích výpočtech bylo použito 5 konstrukčních variant staveb v energeticky pasivním standardu, 4 dřevostavby a jedna stavba zděná. Všechny varianty obvodové stěny mají identický součinitel prostupu tepla $U = 0{,}108\ W/(m^2 \cdot K)$.

L1 – velmi lehká dřevostavba:

Varianta L1 tvoří základ pro ostatní konstrukční varianty. Ve stavbě nejsou užity žádné tepelně akumulační prvky. Konstrukci stavby tvoří lehký dřevěný skelet opláštěný z obou stran sádrovláknitou deskou. Stavební procesy jsou suché, tvořené sádrokartonovým opláštěním stěn, příček a stropů. Podlaha je suchá, složená ze sádrovláknitých desek.

Obvodová stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
2	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
3	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
4	minerální vata / sloupek	120	0,054	1 000	75
5	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
6	celulóza / lať	80	0,051	2 050	106
7	celulóza	150	0,044	2 000	70
8	DVD deska	60	0,054	2 100	265
9	omítka	7	0,650	920	1 600
Tepelná kapacita C: 26,11 kJ/m^{2}K					

Vnitřní stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
2	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
3	minerální vata / sloupek	120	0,054	1 000	75
4	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
5	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
6	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 34,33 kJ/m^{2}K					

Příčka (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
2	DVD rohož / sloupek	80	0,054	2 139	79
3	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 16,99 kJ/m^{2}K					

Podlaha (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	korek	4	0,067	1 500	400
2	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
3	DVD tuhá deska	80	0,052	2 100	150
4	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
5	vzduch	100	0,588	1 010	1
6	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
7	minerální vata / lať	40	0,054	1 000	75
8	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
Tepelná kapacita C: 38,28 kJ/m^{2}K					

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
2	minerální vata / lať	40	0,054	1 000	75
3	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
4	vzduch	100	0,588	1 010	1
5	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
6	DVD tuhá deska	80	0,052	2 100	150
7	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
8	korek	20	0,067	1 500	400
Tepelná kapacita C: 34,71 kJ/m²K					

L2 – dřevostavba:

Oproti variantě L1 jsou navíc použity tepelně akumulační prvky. Hliněný panel s omítkou 30 mm na vnitřní stěně, betonová mazanina 50 mm v podlahách.

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. panel+omítka	30	0,400	1 000	1 550
2	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
3	minerální vata / sloupek	120	0,054	1 000	75
4	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
5	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
6	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 69,03 kJ/m²K					

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	korek	4	0,067	1 500	400
2	beton	50	1,360	1 020	2 300
3	DVD tuhá deska	80	0,052	2 100	150
4	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
5	vzduch	100	0,588	1 010	1
6	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
7	minerální vata / lať	40	0,054	1 000	75
8	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
Tepelná kapacita C:129,05 kJ/m²K					

L3 – akumulační dřevostavba:

Oproti variantě L2 je užito na vnitřní opláštění obvodových stěn a příček 2x sádrokartonu 12,5mm, hliněný panel s omítkou na vnitřní stěně má 45 mm, betonová mazanina 50 mm v podlahách.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	sádrokarton 2x	25	0,220	1 060	750
2	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
3	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
4	minerální vata / sloupek	120	0,054	1 000	75
5	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
6	celulóza / lať	80	0,051	2 050	106
7	celulóza	150	0,044	2 000	70
8	DVD deska	60	0,054	2 100	265
9	omítka	7	0,650	920	1 600
Tepelná kapacita C: 32,46 kJ/m²K					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. panel+omítka	45	0,400	1 000	1 310
2	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
3	minerální vata / sloupek	120	0,054	1 000	75
4	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
5	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
6	sádrokarton	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 79,83 kJ/m²K					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	sádrokarton 2x	25	0,220	1 060	750
2	DVD rohož / sloupek	80	0,054	2 139	79
3	sádrokarton 2x	25	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 26,43 kJ/m²K					

L4 – akumulační dřevostavba:

Na vnitřní opláštění obvodových stěn je použit hliněný panel s omítkou 45 mm, opláštění příček 2x sádrokartonem 15 mm, vyzdívka vnitřní stěny 120 mm + omítky, betonová mazanina 60 mm v podlahách.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. panel+omítka	45	0,400	1 000	1 310
2	DVD rohož / lať	40	0,051	2 139	79
3	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
4	minerální vata / slo	120	0,054	1 000	75
5	sádrovláknitá deska	15	0,300	1 000	1 150
6	celulóza / lať	80	0,051	2 050	106
7	celulóza	150	0,044	2 000	70
8	DVD deska	60	0,054	2 100	265
9	omítka	7	0,650	920	1 600
Tepelná kapacita C: 67,17 kJ/m²K					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. omítka lehčená	15	0,600	1 000	1 400
2	vyzdívka / sloupek	120	0,800	1 145	1 666
3	hl. omítka lehčená	15	0,600	1 000	1 400
Tepelná kapacita C:132,63 kJ/m²K					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	sádrokarton 2x	30	0,220	1 060	750
2	DVD rohož / sloupek	80	0,054	2 139	79
3	sádrokarton 2x	30	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 30,33 kJ/m²K					

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	korek	4	0,067	1 500	400
2	beton	60	1,360	1 020	2 300
3	DVD tuhá deska	80	0,052	2 100	150
4	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
5	vzduch	100	0,588	1 010	1
6	dřevěný panel	35	0,150	2 510	400
7	minerální vata / lať	40	0,054	1 000	75
8	sádrovláknitá deska	20	0,300	1 000	1 150
Tepelná kapacita C:151,24 kJ/m²K					

M1 - zděná stavba:

Stěny a příčky z keramických dutinových tvárnic, obvodové stěny 360 mm + EPS 220 mm, příčka 115 mm, vnitřní stěna 360 mm, podlahy z tvarovek MIAKO 190 mm s betonovou zálivkou 60 mm a betonová mazanina v podlaze 50 mm.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	stěrka	5	0,800	920	1 300
4	EPS 70 F	220	0,039	1 270	15
5	omítka	7	0,650	920	1 600
Tepelná kapacita C: 63,17 kJ/m²K					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
Tepelná kapacita C: 63,35 kJ/m²K					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	115	0,150	960	750
3	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
Tepelná kapacita C: 59,47 kJ/m²K					

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	palubky	15	0,180	2 510	400
2	Beton	50	1,360	1 020	2 300
3	minerální izolace	50	0,045	840	120
4	Beton	600	1,360	1 020	2 300
5	MIAKO	190	0,600	960	650
6	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
Tepelná kapacita C:129,10 kJ/m²K					

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	MIAKO	190	0,600	960	650
3	Beton	60	1,360	1 020	2 300
4	minerální izolace	50	0,045	840	120
5	Beton	50	1,360	1 020	2 300
6	palubky	15	0,180	2 510	400
Tepelná kapacita C:111,92 kJ/m²K					

E.2.4 Větrání, výplně otvorů a stínění

Výměna vzduchu *n* je obecně uvažována jako proměnná, od 2 přes 4, 6, 8 až po 10 násobnou výměnu za hodinu. Jelikož je v době od 12 do 18 hodin venkovní teplota vzduchu vyšší než nejvyšší vnitřní přípustná teplota 27 °C, je přes tuto dobu uvažována snížená výměna vzduchu 0,5 h^{-1}. Sníženou výměnou předcházíme zbytečnému přehřívání místnosti. Výjimkou jsou nezastíněné varianty, kde dochází k přehřívání. Protože je venkovní teplota stále nižší než přehřívané místnosti, výměna vzduchu zůstává stejná. Denní větrání je uvažováno bez použití rekuperace tepla resp. chladu. Pro simulaci bylo zvoleno takové zastínění, které vede ke splnění normového požadavku 27 °C u konstrukční varianty L2 při možné výměně vzduchu n = 6 h^{-1}, tzn. plné zastínění venkovními žaluziemi na západní straně a na jižní straně pouze konstrukční stínění balkónem. Výměna vzduchu 6 h^{-1} byla volena tak, aby byla realizovatelná, v tomto případě příčné větrání při otevřených oknech na obou fasádách.

Varianta stínění

Okna na jižní straně jsou shora účinně stíněna balkóny dalšího podlaží o hloubce 1,3 m. Pro základní výpočet stíněné varianty bylo zvoleno následující stínění oken: na jižní straně jsou okna stíněna pouze balkónem, na západní straně jsou instalovány venkovní žaluzie. Celková propustnost slunečního záření – jižní okna g = 0,63, západní okna s žaluziemi g = 0,02. Činitel prostupu přímého slunečního záření – jižní nezastíněná okna *TauE* = 0,61, západní okna s žaluziemi *TauE* = 0,00. Korekční činitel rámu je

F_f = 0,7 – 0,83. Činitel oslunění f_s je: okno jih 0,25; dveře jih 0,45; okna na západě cca 0,85.

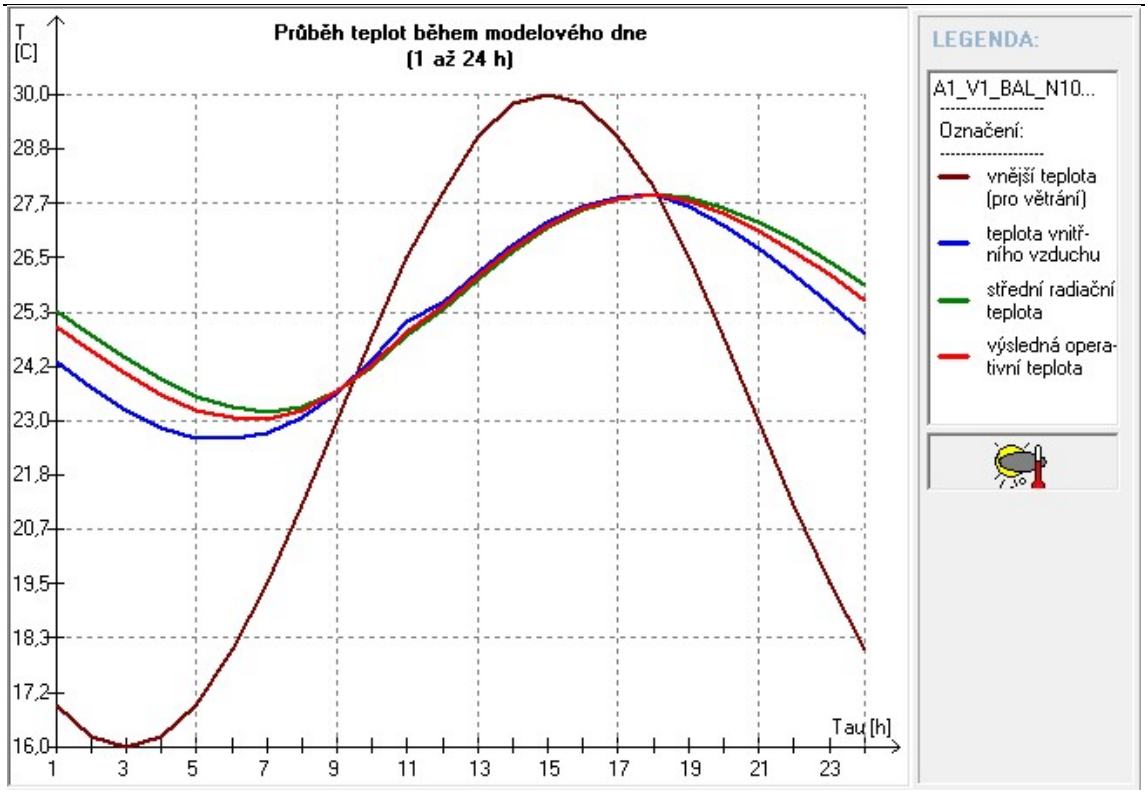
Varianta přehřívání

V přehřívané variantě nejsou okna zastíněna vůbec, není ani uplatněno stínění oken balkónem. U přehřívané varianty jsou zpracovány jenom dvě konstrukční varianty – dřevostavba L2 a zděná stavba M1.

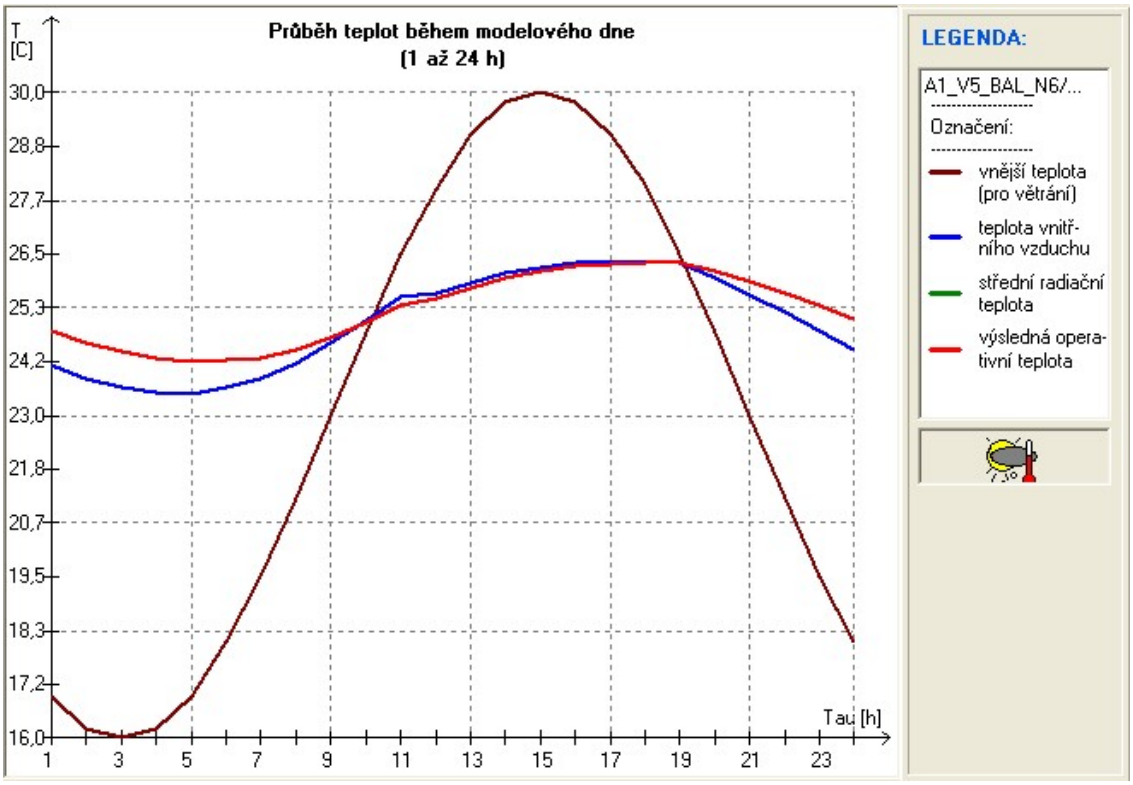
E.2.5 Výsledky

Základní průběh teplot

Průběh venkovních a vnitřních teplot zobrazuje Graf 5 a Graf 6. Graf 5 zobrazuje průběh vnitřní teploty vzduchu pro nejméně hmotnou variantu L1 a Graf 6 pro nejhmotnější variantu M1 při n = 6 h^{-1}. Z rozdílu obou grafů můžeme pozorovat, že hmotnější konstrukční varianta M1 dosahuje nižších teplot vnitřního vzduchu θ_{ai} a má menší výkyvy denní a noční teploty vzduchu v místnosti než lehká konstrukce L1. Těžká stavba s vysokou vnitřní tepelně akumulační schopností je tedy tepelně stabilnější než lehká stavba o nízké vnitřní tepelné akumulaci. Rozdíl v nejvyšší dosažené teplotě vzduchu $\theta_{ai,max}$ je u těchto variant 1,6 °C. Dále můžeme pozorovat, že operativní teplota θ_o dosahuje vždy obdobných hodnot jako vnitřní teplota vzduchu s maximálními rozdíly cca 0,7 °C. Tento fakt je předvídatelný, jelikož stěna o velikém tepelném odporu je venkovní teplotou ovlivňována minimálně, a proto je její povrchová teplota velmi blízká teplotě vnitřního vzduchu.



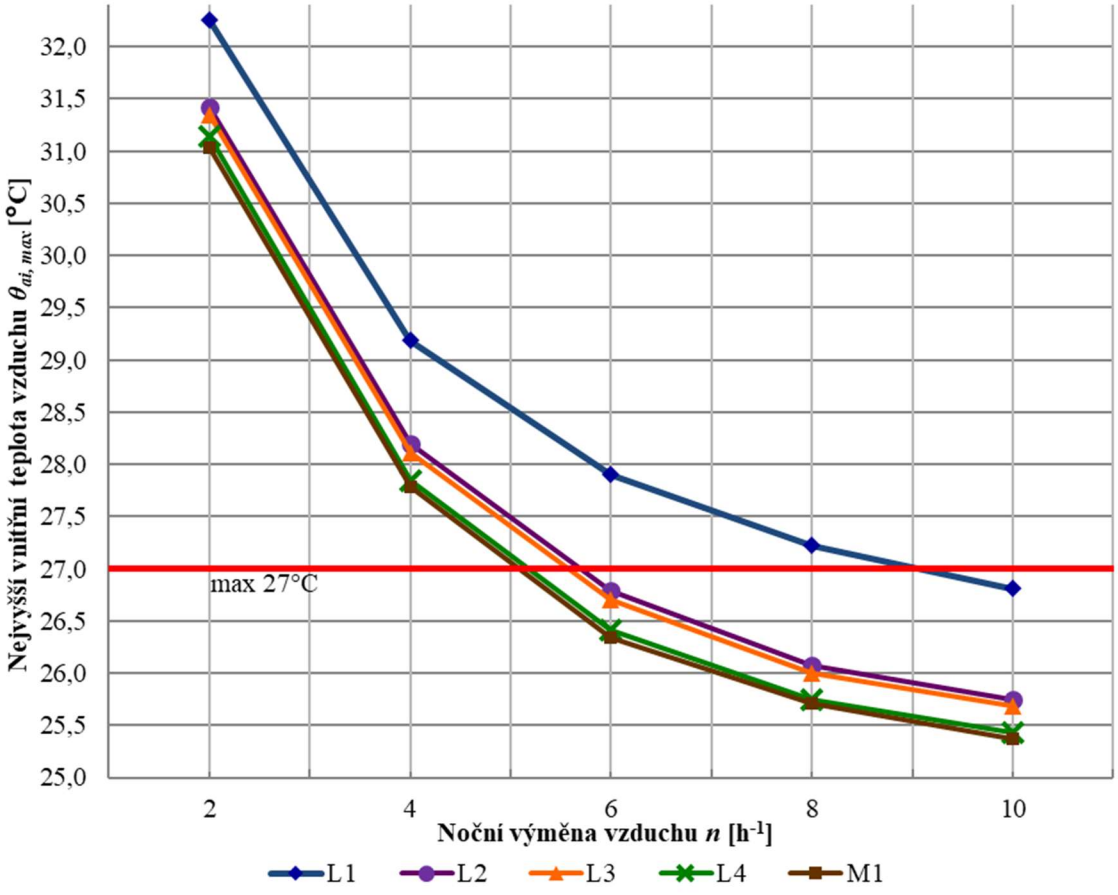
Graf 5 Průběhy vnitřních teplot θ_{ai}, θ_o, θ_r – varianta L1, n=6h^{-1} (simulace SIMULACE)



Graf 6 Průběhy vnitřních teplot θ_{ai}, θ_o, θ_r – varianta M1, n=6h^{-1} (simulace SIMULACE)

Vliv větrání

Hlavními grafy simulace je Graf 7 a Graf 8. Z grafů je patrné, že noční násobnost výměny vzduchu silně ovlivňuje výslednou vnitřní teplotu místnosti $\theta_{ai,max}$. V oblasti násobnosti výměny vzduchu n pod 4 h^{-1} nejvyšší dosažená teplota razantně stoupá, naopak nad 8 h^{-1} již pokles teploty není tak markantní. Výměny vzduchu nad 8 h^{-1} není ale při standardním užívání stavby lehké dosáhnout.



	2	4	6	8	10
L1	32,26	29,19	27,90	27,22	26,81
L2	31,42	28,19	26,79	26,07	25,75
L3	31,35	28,11	26,70	26,00	25,68
L4	31,14	27,85	26,41	25,75	25,43
M1	31,03	27,78	26,34	25,71	25,37

Graf 7 Vnitřní dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ u konstrukčních variant při různé noční výměně vzduchu n – stíněná varianta (simulace SIMULACE)

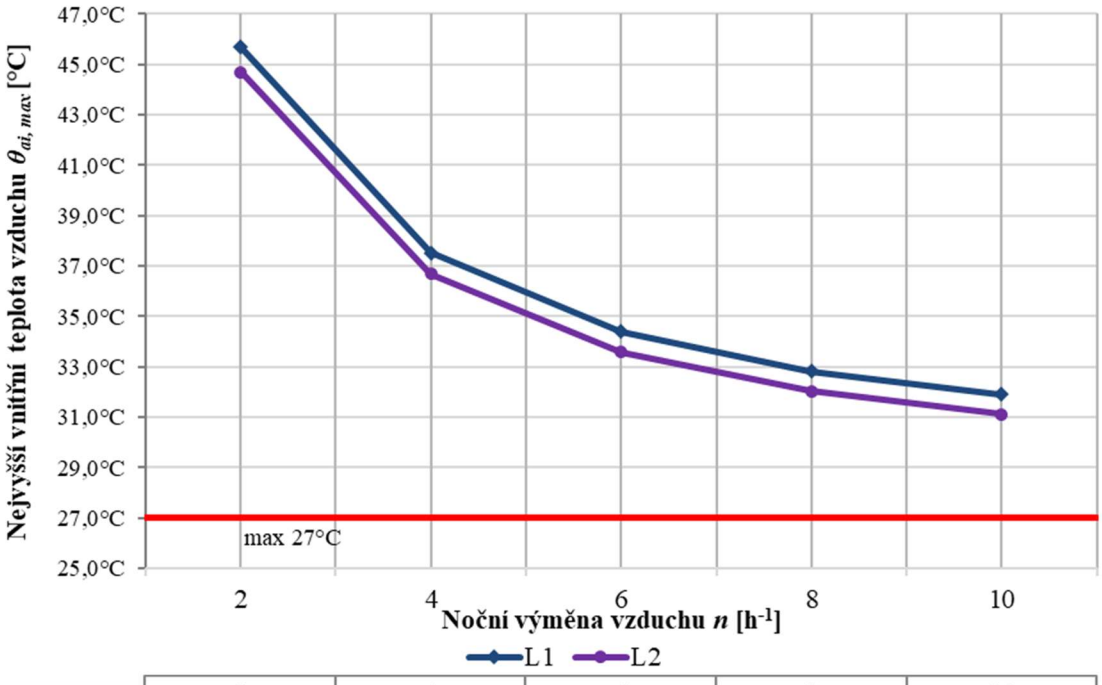
Vliv konstrukčních řešení

Graf 7 a Graf 8 ukazují, že při standardní obvyklé výměně vzduchu $n = 6\ h^{-1}$ je rozdíl v nejvyšší dosažené teplotě vzduchu $\theta_{ai,max}$ mezi nejlehčí variantou L1 (velmi lehká dřevostavba) a nejtěžší variantou M1 (zděná stavba) cca 1,6 °C. Konstrukce L1 představuje velmi lehkou variantu dřevostavby, v praxi se běžně používá betonová mazanina nebo litý anhydrit v podlahách. Tuto variantu představuje konstrukce L2, zde je teplota oproti konstrukci M1 pouze o cca 0,5 °C vyšší. Rozdíl v $\theta_{ai,max}$ u ještě více hmotnějších dřevostaveb se snižuje na cca 0,1 až 0,3 °C, což se dá považovat z hlediska rozlišovacích schopností člověka za téměř identickou hodnotu.

Výpočetní program SIMULACE uvádí ke každé konstrukci její vnitřní plošnou tepelnou kapacitu C v $kJ/(m^2 \cdot K)$, tedy její samotnou tepelně akumulační schopnost. Bližší specifikaci k této veličině a způsob výpočtu SIMULACE neuvádí. Pakliže na základě plošné tepelné kapacity C vypočítáme celkovou tepelnou kapacitu mísnosti, získáme celkovou tepelnou kapacitu místnosti C_m kJ/K. Pro jednotlivé varianty je C_m rovno L1 – 3530 kJ/K, L2 – 6700 kJ/K, L3 – 7100 kJ/K, L4 – 9400 kJ/K, M1 – 10150 kJ/K. Pakliže tyto hodnoty srovnáme s nejvyššími dosaženými teplotami $\theta_{ai,max}$ zjistíme, že zde neplatí přímá úměra. S ubývající tepelnou kapacitou místnosti přibývá exponenciálně nejvyšší dosažená teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ zejména u varianty L1.

Vliv přehřívání místnosti

Pro konstrukční varianty L2 a M1 bylo simulováno přehřívání stavby. Na západní straně objektu nebyly použity venkovní žaluzie a na jižní straně nestíní balkón. Graf 8 ukazuje, že výsledné rozdíly mezi zděnou stavbou M1 a dřevostavbou L2 nejsou velké. Rozdíl nejvyšší teploty vzduchu v místnosti $\theta_{ai,max}$ pro $n = 6\ h^{-1}$ je u těchto variant 0,82 °C. U variant, které se nepřehřívají, byl rozdíl cca 0,35 °C (Graf 7). Opět můžeme pozorovat velký vliv větrání stavby. Dále je znatelný vliv slunečních zisků okny na vzestup vnitřní teploty. Pokud byly teploty vnitřního vzduchu $\theta_{ai,max}$ u stíněných variant na úrovni cca 26,5 °C, u přehřívajících se variant se pohybuje teplota pro stejnou míru nočního větrání na úrovni cca 34,0 °C, což je o 7,5 °C více.



	2	4	6	8	10
L1	45,68	37,53	34,41	32,83	31,90
L2	44,70	36,68	33,59	32,03	31,12

Graf 8 Vnitřní dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ u konstrukčních variant při různé noční výměně vzduchu n – varianta přehřívání (simulace SIMULACE)

E.2.6 Závěr simulace

V práci byly na nejvyšší denní vnitřní teplotu vzduchu v kritické místnosti $\theta_{ai,max}$ posouzeny různě těžké konstrukční varianty energeticky pasivních dřevostaveb a také zděná stavba. Z výsledků je patrné, že rozdíl nejvyšší teploty $\theta_{ai,max}$ mezi velmi lehkou dřevostavbou a zděnou stavbou je poměrně malý. Pro běžné okrajové podmínky se rozdíl pohybuje v rozmezích zhruba od cca 0,3 až po 1,5 °C podle míry vnitřní tepelně akumulační hmoty u dřevostavby.

Daleko podstatnějším a v konečném důsledku rozhodujícím faktorem, je množství přijaté sluneční energie zejména přímým zářením přes okna. Abychom splnili normový požadavek nejvyšší denní teploty vzduchu v interiéru $\theta_{ai,max}$ 27 °C, bez ohledu na typ stavby, jsme u posuzované místnosti museli zastínit veškerá okna na západě (s účinností cca 97%) a na jihu alespoň konstrukčně balkónem (s účinností cca 65%). Jakmile nezastíníme žádná okna a připustíme přehřívání stavby, nejvyšší teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ u

varianty L2 a M1 při noční násobnosti výměny vzduchu $n = 6\ h^{-1}$ vystoupí zhruba o 7,5 °C až na teplotu 34,0 °C (viz Graf 8).

Dalším velmi podstatným faktorem je výměna vzduchu v místnosti. Pokud snížíme v základní variantě L2 násobnost výměny vzduchu z 6 na 4 h^{-1}, nejvyšší denní teplota $\theta_{ai,max}$ se zvýší o 1,4 °C. Pokud výměnu snížíme na 2 h^{-1}, teplota se zvýší o 4,6 °C (Graf 7). V oblasti výměny vzduchu nad 8 h^{-1} již pokles teploty vnitřní teploty není tak markantní.

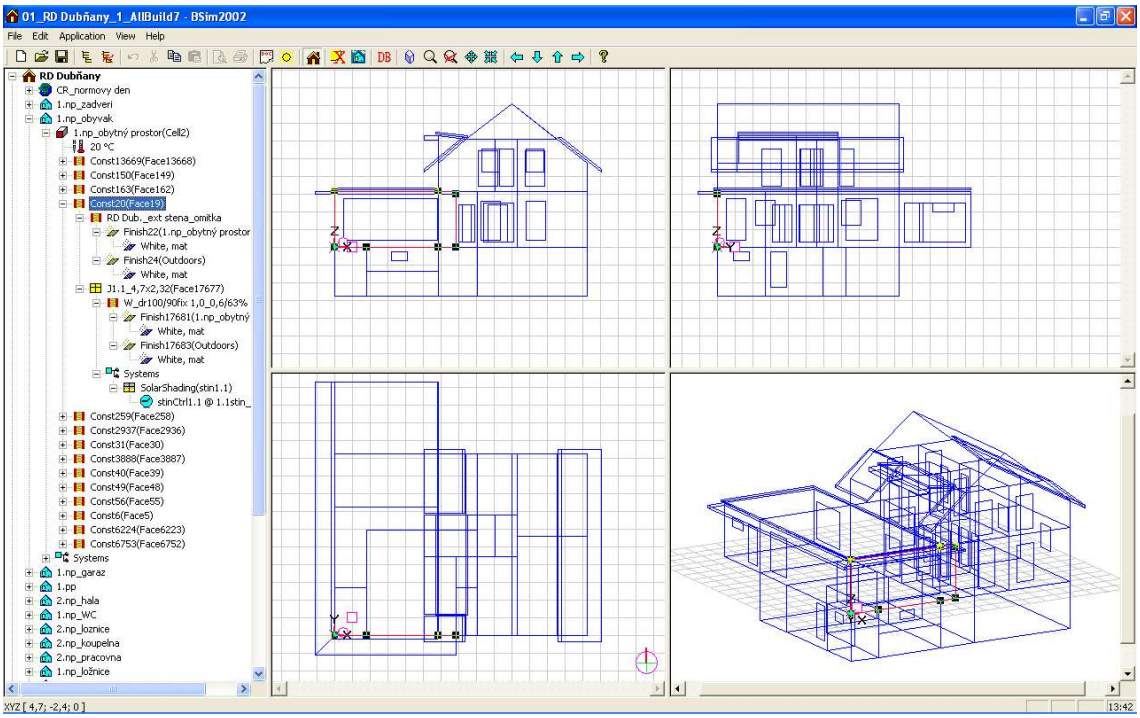
Z pohledu prostupu tepla vnější stěnou se předpokládá, že tento vliv není zcela zásadní. Vnitřní povrchová teplota, resp. radiační teplota obvodových stěn θ_r je přes den téměř identická s teplotou vzduchu θ_{ai} (Graf 5). Stěny tedy příliš tepelně nezatěžují místnost.

Z hlediska uplatněných faktorů ovlivňujících tepelnou stabilitu (podle části B.5.7) se dá zjednodušeně říci, že hlavní vliv má tepelná zátěž slunečními zisky okny. Druhé pořadí má vliv větrání místnosti, v poslední řadě je vliv vnitřní tepelně akumulační hmoty. Pakliže není dřevostavba extrémně lehká, jsou si dosažené nejvyšší teploty $\theta_{ai,max}$ se zděnou stavbou velmi blízké. Vliv tepelně akumulační hmoty stavby dle uplatněné metodiky hodnocení (viz B.5.3) je podle výstupů poměrně malý a není tedy zásadní. Sekundární otázkou je princip výpočtu samotné tepelné kapacity místnosti C_m programem SIMULACE a její věrohodnost.

E.3 Výpočetní program BSim

E.3.1 Popis programu BSim

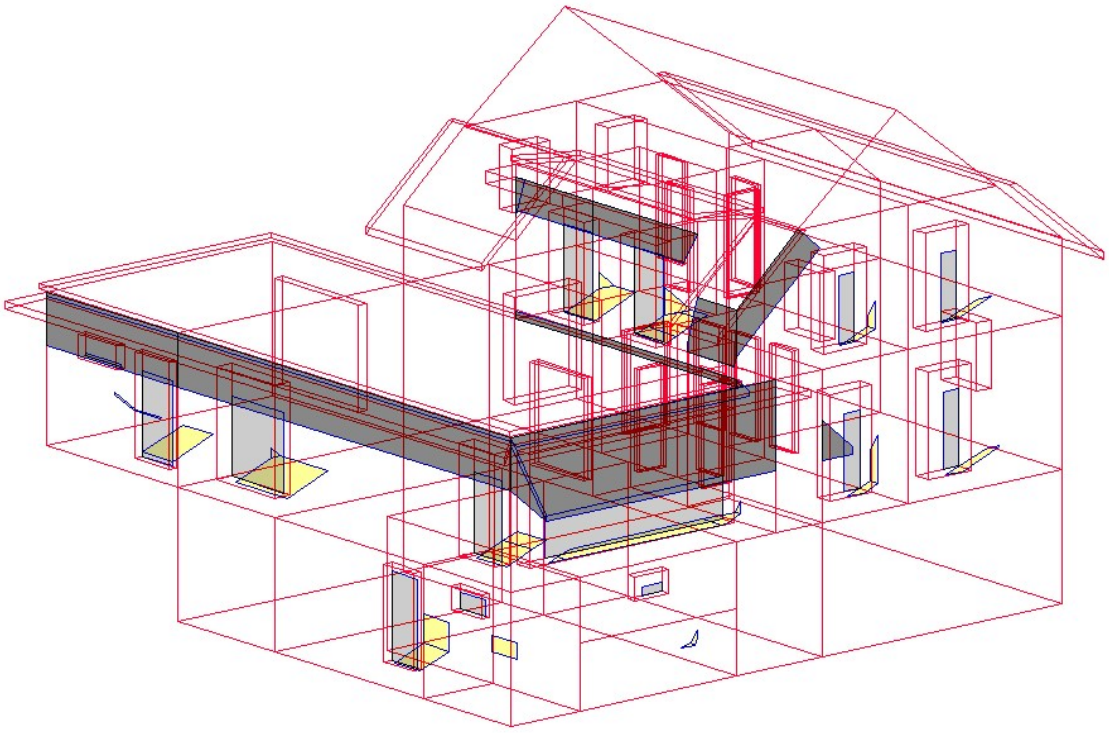
BSim 2000 vytvořila dánská společnost Danish Building Research Institute (BSim = Building simulation). Software *BSim 2000* a jeho novější verze *BSim 2002* slouží pro simulaci tepelně vlhkostního mikroklimatu budov, modelování energetického chování včetně spotřeby energie na provoz technického zařízení.



Obr. 6 Prostředí programu BSim - zobrazení objektu v modulu SimView

E.3.2 Principy výpočtů v BSim

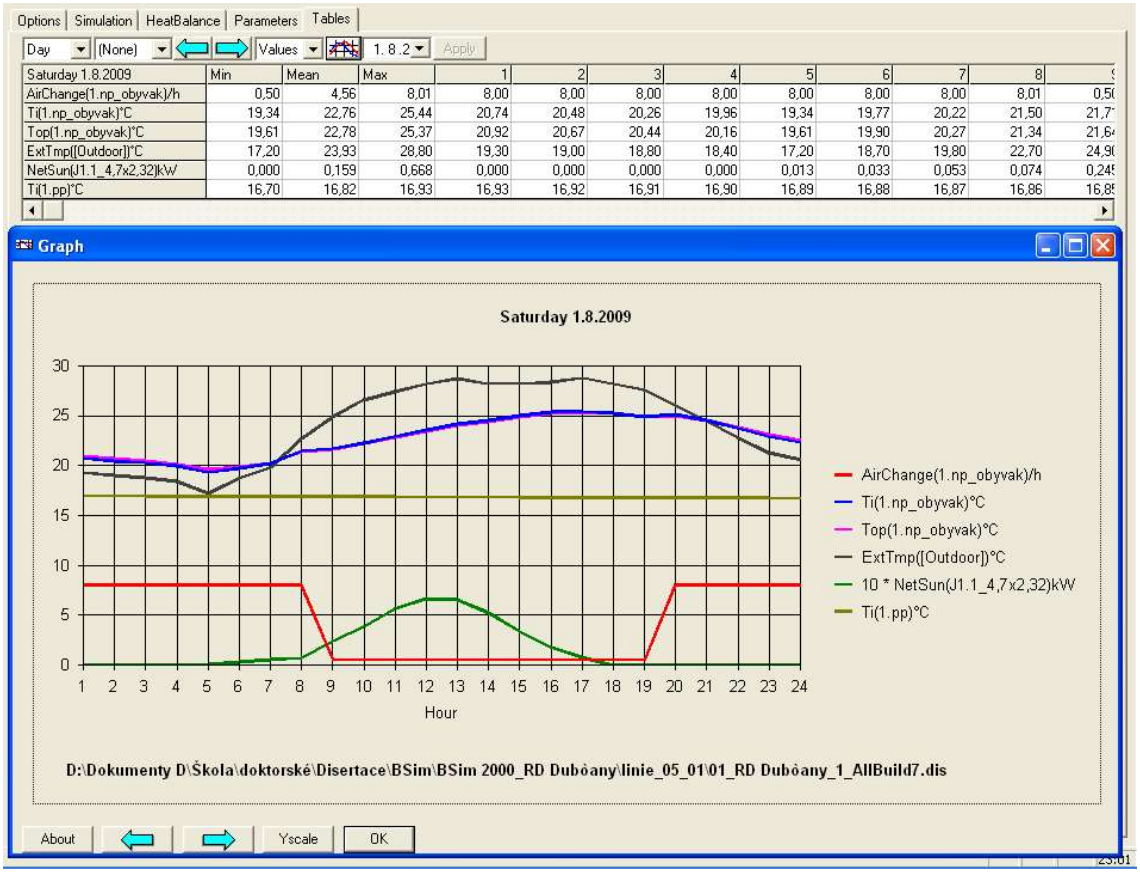
Program provádí numerickou simulaci budovy během maximálně jednoho roku v klimatických podmínkách, které mu budou zadány. Simulace v programu *BSim* není 3D simulace v pravém slova smyslu. Trojrozměrný objekt je umístěn do výpočetního prostředí, na objekt dále působí zadané venkovní podmínky včetně slunečního záření. Slunce se při simulaci pohybuje po obloze a ozařuje objekt, samotný objekt může na svoje části i na ostatní objekty okolo vrhat stíny. Dále jsou již všechny veličiny a hodnoty zjišťovány pomocí matematicko-fyzikálních vzorců, ve kterých figurují plochy a objemy. Pro výpočet šíření tepla a radiace, proudění kapalin a plynů se zde tedy nepoužívají trojrozměrná pole, ale zjednodušující vzorce. Jedná se tedy o kvazi 3D model.



Obr. 7 Prostředí programu BSim - zobrazení objektu v modulu XSun včetně stínů a slunečních zisků

E.3.3 Prostředí programu BSim

Program BSim je tvořen 3D prostředím, ve kterém se modelují jednotlivé objekty – *SimView* (Obr. 6). Dále je tvořen částí *XSun*, ve které je promítáno sluneční záření dopadající na objekt (Obr. 7). Část *tsbi5* má na starosti výpočet zadaných údajů a zpracování výsledků (Obr. 8). Dále je zde databáze stavebních materiálů a konstrukčních skladeb s označením *SimDB* (Obr. 9). BSim při spuštění výpočtu počítá všechny parametry, které z námi zadaných klimadat uvnitř objektu jde zjistit. To znamená teplotu a vlhkost ve stavebních konstrukcích i v místnostech, všechny toky energií v celém objektu, požadovanou energii na uvedení vnitřního klimatu do určitého stavu – vytápění a chlazení, osvětlení a oslunění ve všech místnostech, výměny vzduchu, tlak vzduchu, potřebu elektrické energie atd.

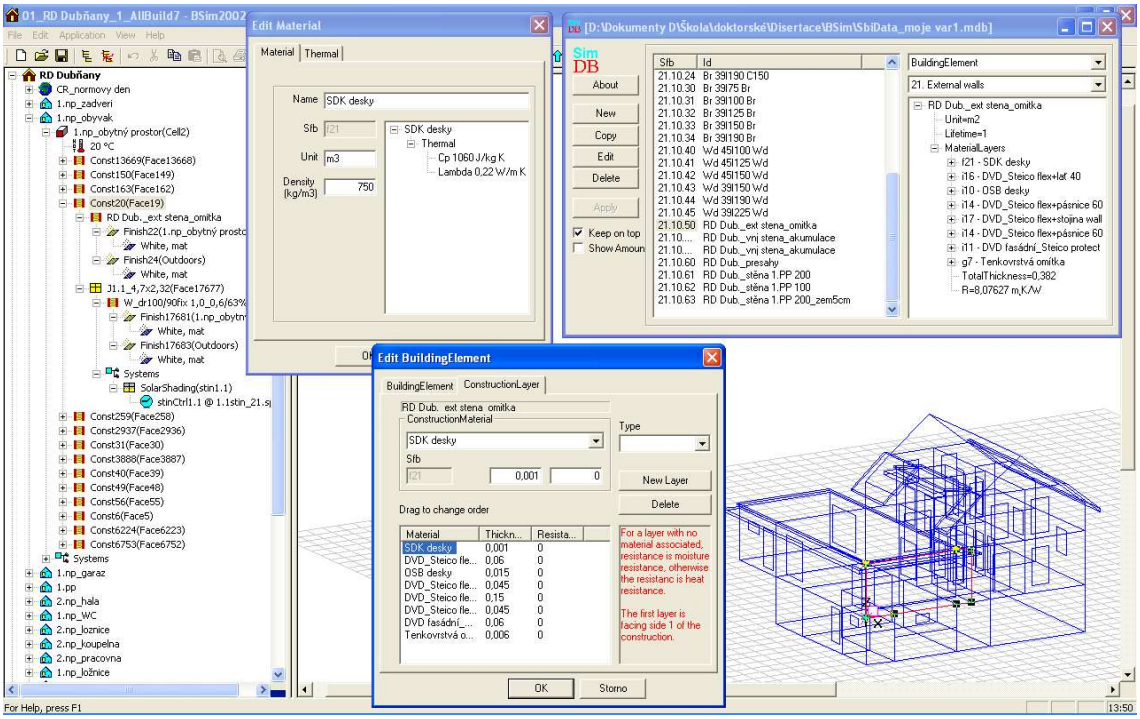


Obr. 8 Prostředí programu BSim - zobrazení vybraných výsledků výpočtu v modulu tsbi5

Simulovaný objekt je tvořen z jednotlivých *místností*. Jedna, anebo více místností může tvořit takzvanou *zónu*, kde se pro každou zónu může nastavit jiný profil jejího chování v podobě – teploty, vlhkosti, oslunění, zastínění oken, větrání, neprůvzdušnosti, tepelných a vlhkostních zisků atd. Dále je v zónách také možné modelovat technické zařízení v podobě systémů pro nucené větrání, vytápění, chlazení a osvětlení. Můžeme simulovat výměnu tepla a vlhkosti mezi jednotlivými zónami. Všechny tyto děje se zadávají na základě profilu, ve kterém se pro daný případ nastaví:

- intenzita během dne (např.0–100 %)
- čas, kdy je proces během roku aktivní (např. neustále, nebo pouze 1 den v týdnu)
- konkrétní charakteristika děje (např. infiltrace vzduchu pouze základní, bez vlivu tlaku větru)

Software BSim zjišťuje dané veličiny vždy pro 1 celou zónu, pokud je v zóně více místností, jako výslednou hodnotu zobrazí průměr ze všech místností.



Obr. 9 Prostředí programu BSim - zobrazení jednotlivých skladeb konstrukcí v modulu SimDB

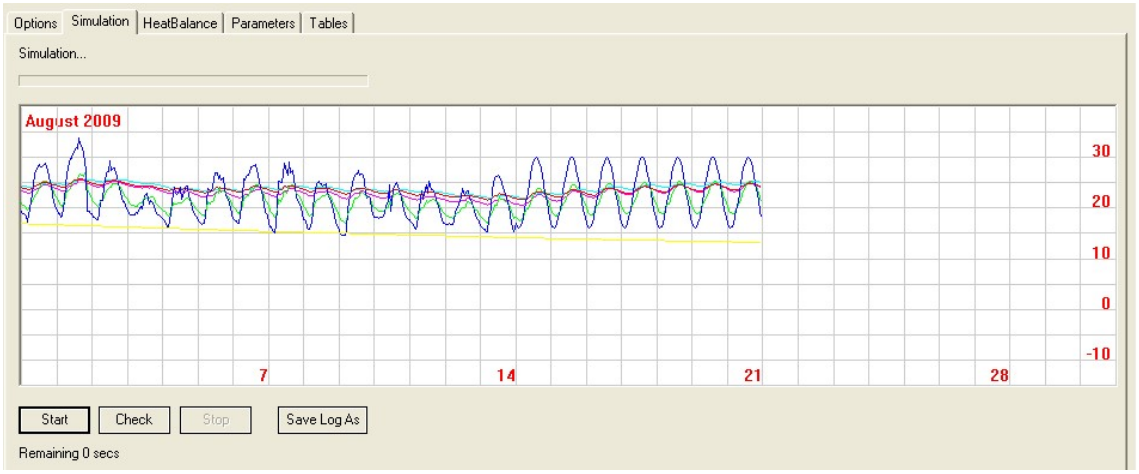
E.3.4 Vytváření modelu a výpočet

Objekt je tvořen *uzly* s danými souřadnicemi, ty dále tvoří jednotlivé plochy. Tvorba modelu se provádí pomocí vytvoření počáteční místnosti, poté se k ní začnou přidávat místnosti další pomocí vytahování další místnosti z místnosti předešlé. Takto vytvoříme celé patro objektu. Vytvořené místnosti a celky můžeme dále měnit pomocí přesouvání a vytváření nových uzlů v plochách. Místnosti a plochy můžeme také dále zcelovat a rozdělovat. V programu je obtížné modelovat příliš složité celky místností, které spolu navzájem komplikovaně sousedí. Proto je vhodné model objektu předem zjednodušit, rozměry zaokrouhlovat a jednotlivé tvary zjednodušit. Předejde se tak možným chybám v modelu, které by mohly nastat.

Dále se v databázi *SimDB* vytvoří konstrukční skladby objektu a přiřadí se jednotlivým plochám. Toto může být realizováno již paušálně pro všechny konstrukce. Vytvoří se dané zóny a k nim se přiřadí jednotlivé místnosti. Pro každou zónu se definuje uživatelský profil, který může obsahovat: chlazení, vytápění, infiltraci vzduchu, větrání, nucené větrání, osvětlení, vlhkostní zisky, zisky od lidí, zisky od zařízení, *mixing* vzduchu mezi místnostmi.

Dále je podmínkou vložit do programu klimadata a určit polohu objektu zeměpisnými souřadnicemi včetně orientace ke světovým stranám. Klimadata musí být vložena do programu v textovém souboru ve specifickém formátu. Pro zdárné spuštění výpočtu je potřeba, aby klimadata obsahovala hodinové hodnoty minimálně pro: venkovní teplotu, vlhkost vzduchu, přímé sluneční záření, difuzní záření. Dále se může do výpočtů v podobě klimadat zahrnout: stupeň zataženosti oblohy, rychlost větru, směr větru, entalpie.

Samotný výpočet provádí modul *tsbi5*. Při upřesnění výpočtu se určí datum, pro které se má simulace provést. Dále pak počet kroků výpočtu za hodinu – počet iterací a jiné upřesňující informace. Následně je proveden samotný výpočet (obr.5). Hodnoty, které mají být zobrazeny ve výsledných tabulkách a grafech, můžeme vybrat dle uvážení. Všechny výsledky jsou pak uloženy do externího souboru, můžeme je kdykoliv znovu otevřít.



Obr. 10 Prostředí programu BSim - probíhající simulace objektu v modulu tsbi5

E.3.5 Rezervy simulace v programu BSim

Program BSim 2002 není prozatím vývojáři již dále rozvíjen. Přestože se zde může modelovat spousty dějů, některé zde prozatím chybí:

- V programu se nedají vytvářet dvouplášťové větrané konstrukce.
- Program v domě neumí simulovat prostorové proudění vzduchu. Výměny mezi místnostmi jsou realizovány pomocí funkce *mixing*.
- Průchod slunečního záření přes výplně otvorů – podíl rámu k celé ploše okna se zachovává i při částečném oslunění okna - pouze fixní hodnota procenta zasklení.

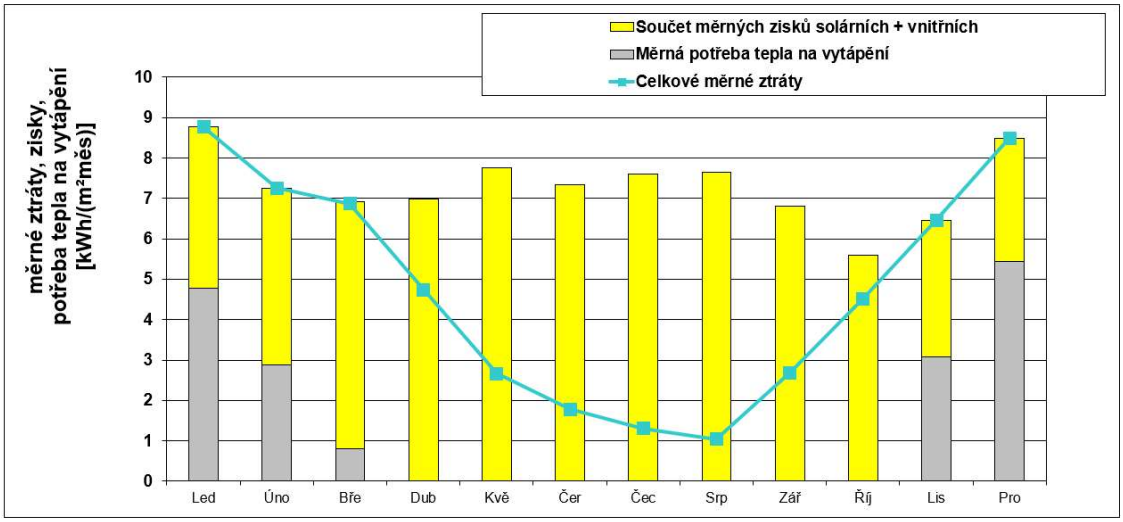
- Celková energetická propustnost slunečního záření g je zpracována pro různé typy zasklení, včetně její proměnné hodnoty při různém úhlu dopadu.
- Vliv ostění nefunguje při energetických výpočtech (pouze při denním osvětlení).
- Vliv stínění od přesahu střechy a bočního přesahu stěn je zapracován.
- Rozdělení slunečních zisků pevně na přímou a difuzní složku.

E.4 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.

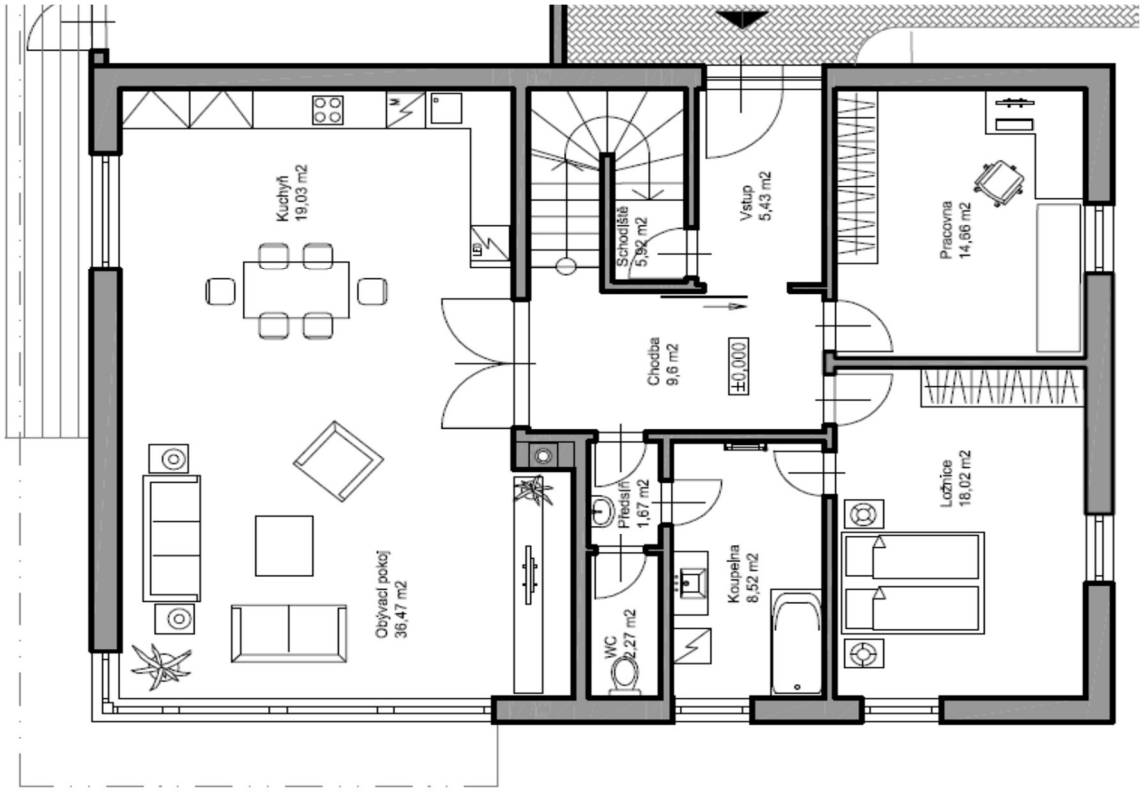
Obr. 11 Pasivní RD Dubňany – jihozápadní pohled

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 kWh/(m^2·a) (Graf 9).

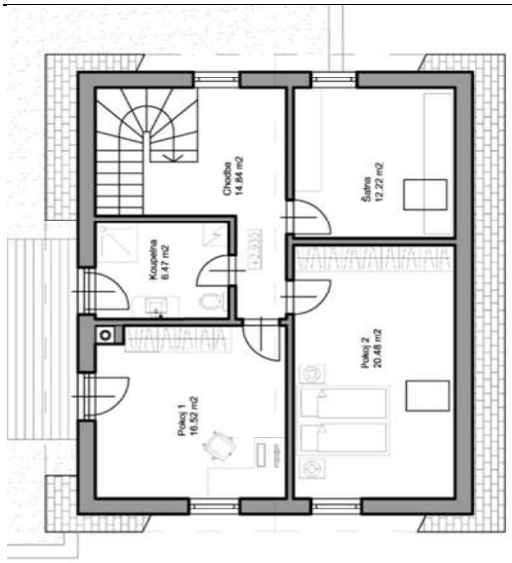


Graf 9 Bilance potřeby tepla na vytápění pasivního domu RD Dubňany (součet cca 17 kWh/(m²·a))

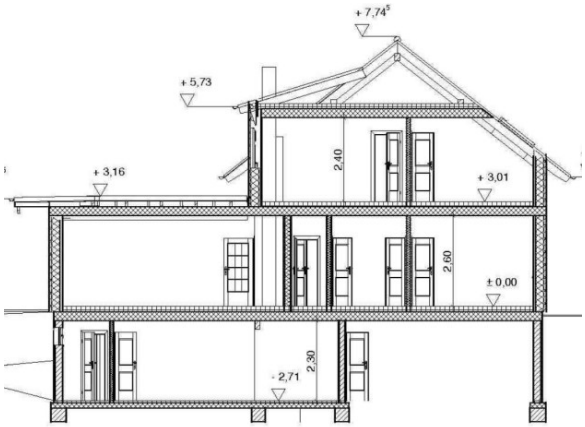
Objekt je dělen na dvoupodlažní část se šikmou střechou, obytným podkrovím a nevytápěnou půdou (Obr. 11). Jednopodlažní část, ve které se nachází obytný prostor, je zastřešena plochou dvouplášťovou ozeleněnou střechou. Za domem se nachází garáž, dům je podsklepen.



Obr. 12 Pasivní RD Dubňany – půdorys 1.NP – vlevo obytný prostor



Obr. 13 Pasivní RD Dubňany – půdorys Podkroví



Obr. 14 Pasivní RD Dubňany – příčný Řez

V domě je užito nuceného větrání s rekuperací tepla. Je vybaven také vzduchovým zemním registrem pro předehřev a předchlazení větracího vzduchu. Vytápění je řešeno kotlem na tuhá paliva. Na střeše jsou umístěny solární kolektory na přípravu TV.

Dům má poměrně malá okna na J a V stranu části se šikmou střechou, naopak v obytném prostoru pod plochou střechou je velký prosklený výkladec (Obr. 15 a Obr. 16). Obytný prostor je tedy kritickou místností z hlediska letního přehřívání.

Obr. 15 Pasivní RD Dubňany – prosklený výkladec obytného prostoru

Obr. 16 Pasivní RD Dubňany – severovýchodní pohled bez velkých oken

Konstrukční 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. Podlaha 1.NP nad sklepem je doplněna

o kročejovou izolaci a suchou, lehkou plovoucí podlahu. Vnitřní nosné stěny a příčky jsou složeny z dřevěných hranolů tl. 100 a 160 mm s vloženou izolací, které jsou opláštěny OSB a SDK deskami. Uvnitř stavby nejsou kromě malé vyzdívky z nepálených cihel v obytném prostoru za TV žádné akumulační stěny, vyzdívky nebo betonové mazaniny v podlahách. Dům se dá tedy označit za poměrně lehkou dřevostavbu. Součinitel prostupu tepla U obalových konstrukcí je: obvodová stěna 0,122 W/(m^2·K), podlaha 0,099 W/(m^2·K), střecha 0,113 W/(m^2·K). Přesný popis konstrukčních skladeb je uveden v části E.5.3.

Okna jsou dřevěná eurookna s U_W průměrně 0,82 W/(m^2·K), hodnota g = 63 %. Všechna okna, kromě severu, jsou stíněna předokenními žaluziemi. Obytný prostor je stíněn konstrukčním přesahem ploché střechy.

Měření letní tepelné stability probíhalo v obytném prostoru pod plochou střechou v 1.NP a v podkroví, v zatím neužívané místnosti na JV (Pokoj 2), s oknem směrovaným na J. Měření zimní tepelné stability probíhalo v podkroví v místnosti s okny umístěnými na J a Z (Pokoj 1).

E.5 Srovnávací simulace letní tepelné stability – SIMULACE vs. BSim – dle ČSN 730540

E.5.1 Cíl srovnávací simulace

Cílem je porovnání simulací téhož objektu provedených v odlišných výpočetních programech. Posuzován je reálný objekt - pasivní dřevostavba RD Dubňany (viz část E.4). Je porovnávána kvazistacionární simulace programem SIMULACE 2009 dle ČSN 730540-2 [5] 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.

E.5.2 Posuzovaný objekt

Předmětem simulace je skutečná stavba pasivní RD Dubňany. Podrobný popis stavby, konstrukcí, fotografií atd. je uveden v části E.4. Dům je řešen v energeticky pasivním standardu s nuceným větráním s rekuperací tepla. Skutečný konstrukční systém je tvořen lehkým dřevěným skeletem z I nosníků. Posuzovanou místností v simulaci je obytný prostor v 1.NP, který se nachází na jihozápadním rohu stavby pod plochou střechou (Obr. 17). Místnost má na jižní straně velký prosklený výkladec, zároveň většina obalových konstrukcí sousedí s exteriérem (Obr. 18). Je zde tedy předpoklad většího přehřívání místnosti.

Obr. 17 RD Dubňany - obytný prostor má na jižní straně velký prosklený výkladec

Obr. 18 RD Dubňany – prosklený výkladec je stíněn přesahem střechy a venkovními žaluziemi

E.5.3 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 akumulační 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/(m^2·K).

L1 – lehká dřevostavba – skutečné konstrukce:

Varianta L1 tvoří základní konstrukční variantu. Konstrukce v této variantě jsou identické se skutečně instalovanými konstrukcemi ve stavbě. Jediný rozdíl oproti reálné konstrukci je ve zdvojeném opláštění obvodových stěn sádrokartonem.

Obvodová stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	*SDK	25	0,220	1 060	750
2	DVD rohož+lať	60	0,047	2 127	69
3	OSB deska	15	0,130	1 700	600
4	DVD rohož+pásnice	90	0,049	2 139	79
5	DVD rohož+stojina	150	0,041	2 104	48
6	DVD fasádní	60	0,051	2 100	250
7	Tenkovrstvá omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita C: 28,58 kJ/m^{2}K					

Vnitřní stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	*SDK desky	13	0,220	1 060	750
2	OSB desky	12	0,130	1 700	600
3	DVD rohož+sloupek	160	0,050	2 139	79
4	OSB desky	12	0,130	1 700	650
5	SDK desky	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 32,83 kJ/m^{2}K					

Příčka (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	*CPN stěna	150	0,910	1 000	1 800
2	OSB desky	12	0,130	1 700	600
3	DVD rohož+sloupek	160	0,050	2 139	79
4	OSB desky	12	0,130	1 700	650
5	SDK desky	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita C: 226,24 kJ/m^{2}K					

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*OSB deska	22	0,130	1 700	600
2	DVD podlaha	65	0,042	2 100	155
3	OSB deska	22	0,130	1 700	600
4	DVD rohož+pásnice	90	0,049	2 139	79
5	DVD rohož+stojina	270	0,043	2 095	55
6	Desky CETRIS	12	0,210	1 580	1 350
Tepelná kapacita C: 32,59 kJ/m²K					

Plochá dvouplášťová střecha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*sádrokarton	13	0,220	1 060	750
2	OSB deska	12	0,130	1 700	600
3	DVD rohož+pásnice	90	0,049	2 139	79
4	DVD rohož+stojina	270	0,043	2 095	55
5	prkna	24	0,170	2 510	400
6	vzduch	90	0,588	1 010	1
7	OSB deska	22	0,130	1 700	600
8	substrát	120	1,000	750	1 600
Tepelná kapacita C: 30,95 kJ/m²K					

L2 – dřevostavba:

Varianta L2 vychází ze základní skladby L1. Ve skladbě podlahy je přidána betonová mazanina 50 mm.

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*OSB deska	22	0,130	1 700	600
2	beton	50	1,360	1 020	2 300
3	DVD podlaha	65	0,042	2 100	155
4	OSB deska	22	0,130	1 700	600
5	DVD rohož+pásnice	90	0,049	2 139	79
6	DVD rohož+stojina	270	0,043	2 095	55
7	Desky CETRIS	12	0,210	1 580	1 350
Tepelná kapacita C: 126,50 kJ/m²K					

M1 – zděná stavba:

Varianta M1 představuje těžkou zděnou stavbu. Pro vnější a vnitřní nosné zdivo keramické lehčené tvárnice 360 mm, pro příčky 115 mm. Z venku jsou stěny zatepleny EPS izolací, střecha minerální izolací. Vodorovné konstrukce jsou z tvarovek MIAKO s betonovou zálivkou 60 mm, kročejovou izolací s další betonovou mazaninou 50 mm.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	stěrka	5	800,000	920	1 300
4	EPS 70 F	225	0,039	1 270	15
5	Tenkovrstvá omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita C: 63,17 kJ/m²K					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	stěrka	5	800,000	920	1 300
4	EPS 70 F	37	0,039	1 270	15
5	Tenkovrstvá omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita C: 63.10 kJ/m²K					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	keram. tvárnice	115	0,150	960	750
3	omítka VC	15	0,990	790	1 800
Tepelná kapacita C: 59,47 kJ/m²K					

Podlaha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	*palubky	15	0,180	2 510	400
2	beton	50	1,360	1 020	2 300
3	minerální izolace	50	0,045	840	120
4	beton	60	1,360	1 020	2 300
5	MIAKO	190	0,600	960	650
6	EPS 70 F	330	0,039	1 270	15
Tepelná kapacita C: 129,35 kJ/m²K					

Plochá dvouplášťová střecha (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	omítka VC	15	0,990	790	1 800
2	MIAKO	190	0,600	960	650
3	beton	60	1,360	1 020	2 300
4	minerální izolace	320	0,040	840	120
5	vzduch	90	0,588	1 010	1
6	OSB	22	0,130	1 700	600
7	substrát	120	1,000	750	1 600
Tepelná kapacita C: 109,13 kJ/m²K					

E.5.4 Popis kvazistacionární simulace

Je provedena kvazistacionární simulace letní tepelné stability v programu SIMULACE 2009 dle ČSN 730540-2 [5]. Dále je provedena numerická simulace v programu BSim 2002, která kvazistacionární stav podle dotčené normy kopíruje.

Simulace probíhala ve dvou základních módech. Stíněná varianta, která vyhovuje požadavkům na vnitřní teplotu a přehřívané varianty, kde nejsou okna nijak stíněna. Výměna vzduchu *n* je uvažována proměnná od 2 přes 4, 6, až po 8násobnou výměnu za hodinu. Jelikož je v době od 9 do 19 hodin venkovní teplota vzduchu většinou vyšší než vnitřní teplota (v základě 27 °C), je přes tuto dobu uvažována snížená minimální hygienická výměna vzduchu 0,5 h^{-1}. Obytný prostor na jihu a západě lemuje venkovní přesah střechy, který velmi účinně stíní spodní okna. U všech variant L1, L2 a M1 bylo zvoleno takové zastínění, které vede ke splnění normového požadavku 27 °C v programu SIMULACE při možné výměně vzduchu 6 h^{-1}. Bylo třeba plné venkovní zastínění venkovními žaluziemi na jižní straně u dvou částí výklade 1,4 x 2,3 m, což je 55 % z celkových okenních otvorů na jižní straně domu, další stínění zde nebylo potřeba. Výměna vzduchu 6 h^{-1} byla volena tak, aby byla realizovatelná, v tomto případě příčné větrání při otevřených oknech na obou fasádách nebo komínovým efektem přes schodiště a 2.NP.

Simulace v programu SIMULACE

Plochy obalových konstrukcí místnosti jsou: vnější stěna – 38,6 m^2 (včetně stěny s garáží); podlaha a strop 57,0 m^2; vnitřní stěna 14,3 m^2 a příčka 11,4 m^2. Plochy jsou stanovené z vnitřních rozměrů, výplně otvorů jsou odečteny. Objem vzduchu místnosti je V = 145,4 m^3. Opory při přestupu tepla na vnitřní straně R_{si} byly voleny (stěna / podlaha / strop) R_{si} = 0,13 / 0,17 / 0,10 (m^2·K)/W a na vnější straně jednotně R_{se} = 0,075 (m^2·K)/W. Součinitel přestupu sáláním byl volen 5,5 W/(m^2·K) a součinitel přestupu prouděním 2,5 W/(m^2·K).

Simulace v programu BSim

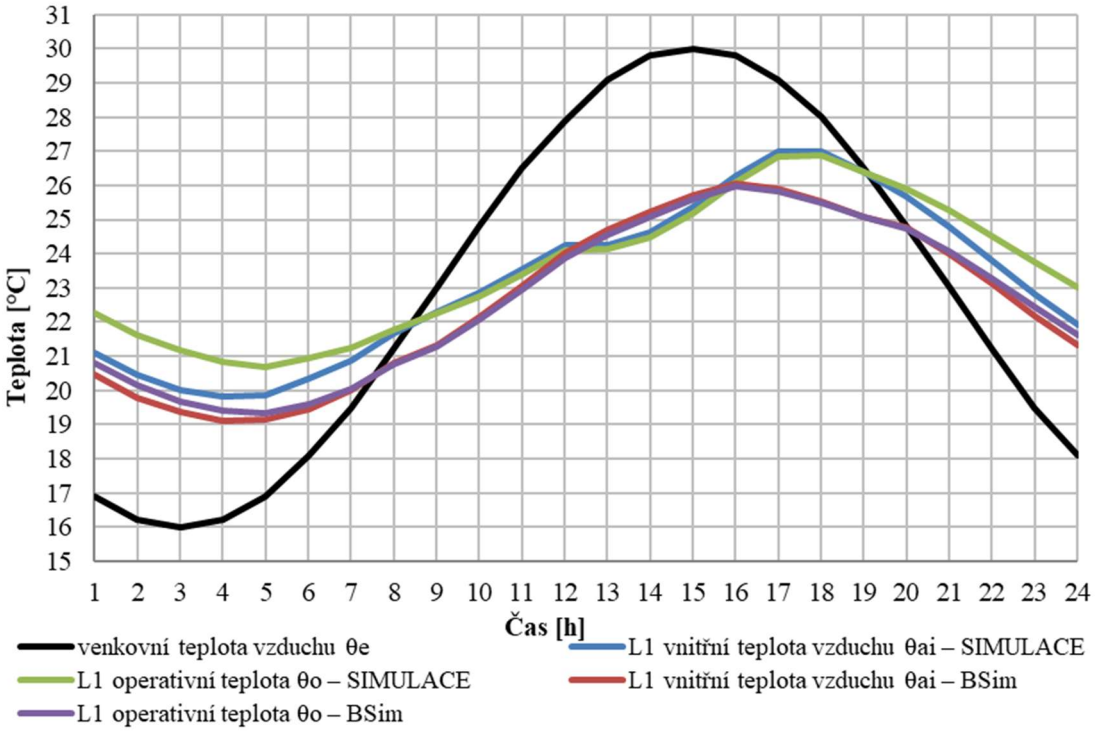
Vstupní údaje pro BSim byly zvoleny shodně s programem SIMULACE – venkovní teplota, globální sluneční záření, výměna vzduchu. Globální sluneční záření J_M bylo v BSim rozděleno na difuzní složku 20 % a přímou složku 80 %. Hodnoty intenzity globálního slunečního záření byly do BSim dosazeny z tabulky H.8 – ČSN 730540-3 [19] (viz Tabulka 2), a to ze sloupce I,H – vodorovná plocha. Srovnávání výsledků BSim a SIMULACE předpokládá, že všechny hodnoty v této tabulce pro jinak orientované osluněné plochy vycházejí z tohoto sloupce - tedy, že s ním do určité míry korespondují. BSim totiž všechny ostatní intenzity pro různě orientované plochy přepočítává z intenzity slunečního záření dopadající na vodorovnou plochu, která se obvykle zjišťuje

pyranometrem. Právě proto byl za vstupní údaje do výpočtů zvolen sloupec I,H. Jelikož BSim neumí modelovat dvouplášťové větrané konstrukce, byly střechy nad obytným prostorem a podkrovím namodelovány jako jednoplášťové s venkovním zastíněním vodorovnou deskou – tedy s vlivem stínění, ale bez vlivu větrané mezery.

Výpočet je proveden takzvaně kvazistacionárně. V klimadatech bylo za sebou seřazeno mnoho identických dnů. Počet dnů byla takový, aby při posledních dvou dnech byly ve vnitřních teplotách θ_{ai} zanedbatelné rozdíly.

E.5.5 Výsledky

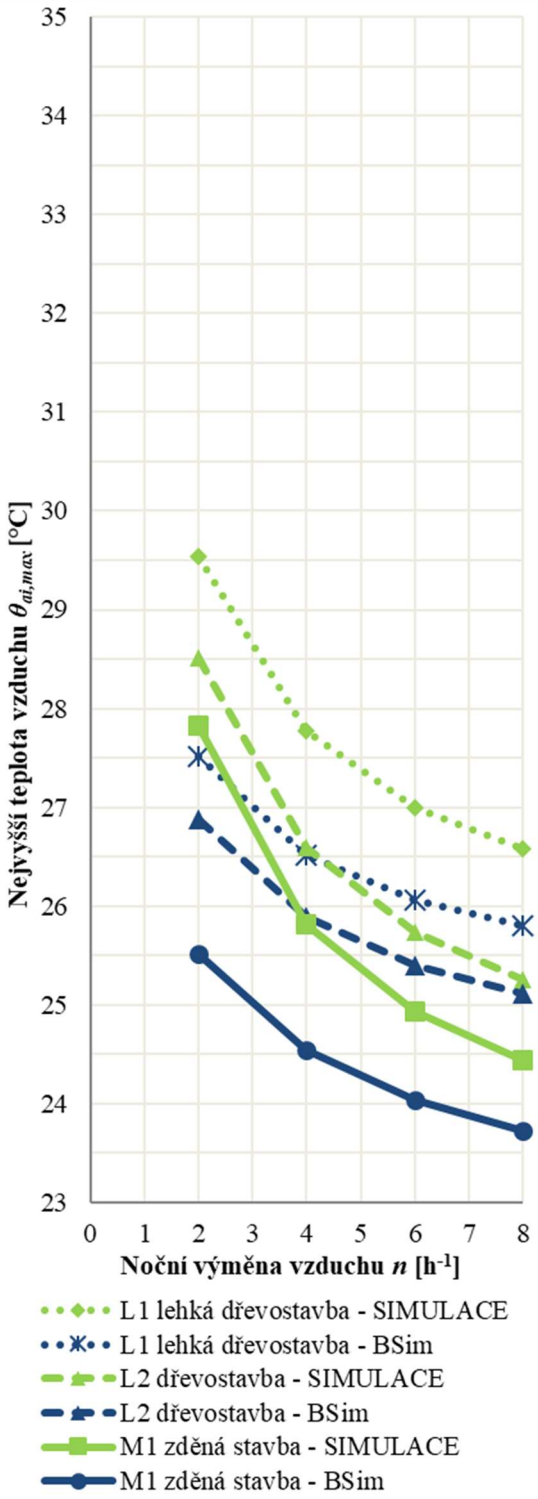
Průběh vnitřních teplot vzduchu θ_{ai} a operativní teploty θ_o pro výměnu vzduchu $n = 6$ h^{-1} zobrazuje Graf 10. Výpočet platí pro normový den dle ČSN 730540–3 [19] a zobrazuje výstupy z programu BSim a SIMULACE. Z grafu lze rozpoznat, že nejvyšší denní teplota vnitřního vzduchu obytného prostoru $\theta_{ai,max}$ je u BSim v čase 16 hodin a u SIMULACE v 17 až 18 hodin. Tyto maxima jsou od nejvyšší venkovní teploty vzduchu θ_e v 15 hodin posunuty v čase. Je to zapříčiněno většími slunečními zisky západními okny, kdy má slunce menší výšku než v poledne. Nejvyšší dosažená teplota vnitřního vzduchu $\theta_{ai,max}$ u je u SIMULACE 27,0 °C, u BSim je to 26,1 °C. Rozdíl v nejvyšší dosažené teplotě vnitřního vzduchu $\theta_{ai,max}$ je ve výši 0,9 °C. Tyto rozdíly budou popsány dále v textu.



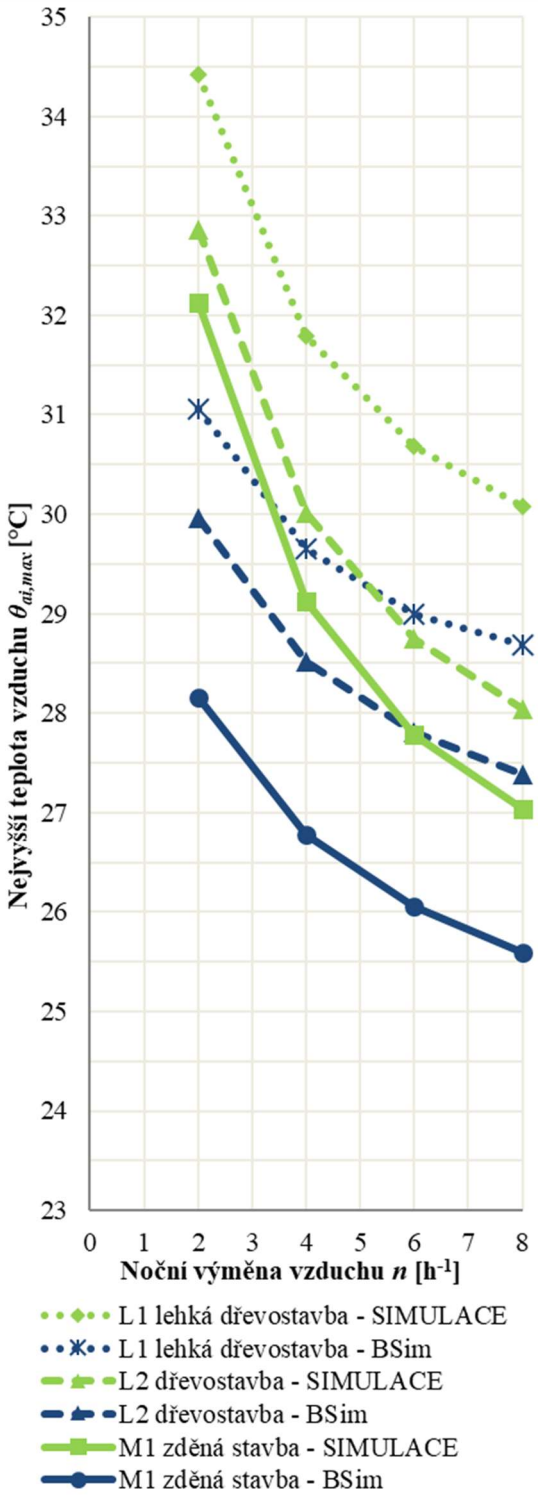
Graf 10 Průběh vnitřních teplot θ_{ai} a θ_o – SIMULACE vs. BSim - kvazistacionární simulace dle ČSN 730540 (noční n=6 h^{-1}, varianta L1)

Přestože operativní teplota θ_o se podle ČSN 730540 – 2 [5] nevyhodnocuje, je to právě tato hodnota, která má popisovat celkové působení místnosti na člověka. Operativní teplota θ_o se od vnitřní teploty vzduchu θ_{ai} u SIMULACE mírně liší, v noci je rozdíl až cca 1,2 °C. U BSim jsou tyto hodnoty θ_{ai} a θ_o velmi blízké až identické.

Graf 11 a Graf 12 ukazují nejvyšší denní teplotu vnitřního vzduchu v místnosti $\theta_{ai,max}$ u všech tří variant konstrukčních systémů L1, L2 a M1 dosaženou při různém nočním větrání n.



Graf 11 Nejvyšší vnitřní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ pro konstrukční varianty při různém nočním větrání – SIMULACE vs. BSim – kvazistacionární simulace ČSN 730540 – varianta stínění

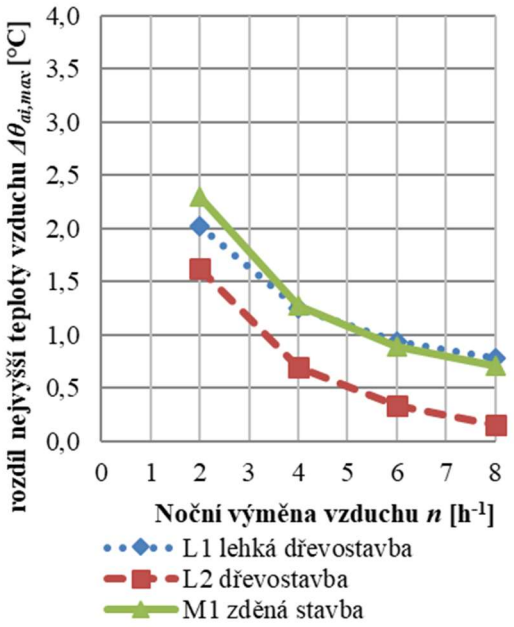


Graf 12 Nejvyšší vnitřní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ pro konstrukční varianty při různém nočním větrání – SIMULACE vs. BSim – kvazistacionární simulace ČSN 730540 – varianta přehřívání

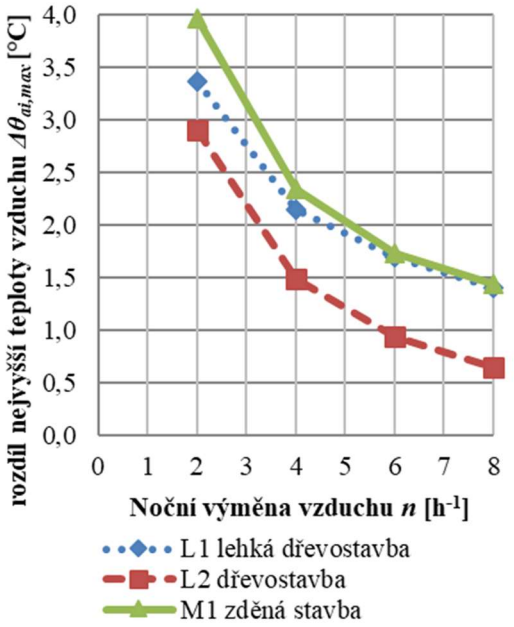
Z obou grafů můžeme sledovat rozdílné výsledky u BSim a SIMULACE. Obecně u variant s těžšími konstrukcemi dochází k menšímu přehřívání, než je tomu u dřevostavby s lehčími konstrukcemi. Rozdíl v dosažené teplotě $\theta_{ai,max}$ mezi dřevostavbou L1 a zděnou stavbou M2 je u stíněné varianty u obou programů zhruba 2 °C. V porovnání obou programů lze pozorovat tyto vztahy:

- Program BSim vždy dospívá k nižší vnitřní teplotě $\theta_{ai,max}$ než SIMULACE.
- S nižším nočním větráním a vyššími solárními zisky se rozdíl mezi programy ve výsledcích zvyšuje (tzn. vyšší tepelná zátěž místnoosti).

V grafech je opět vidět vliv nočního větrání n a slunečních zisků na výslednou teplotu $\theta_{ai,max}$. Graf 11 ukazuje, že při změně noční výměny vzduchu z 6 na 2 h^{-1} se zvýší teplota $\theta_{ai,max}$ o cca 1,5 °C u BSim, a o 2,5 až 3,0 °C u SIMULACE. Graf 12 ukazuje, že ve variantě přehřívání vzroste teplota $\theta_{ai,max}$ o 2,0 u BSim a o 4,0 °C u SIMULACE.



Graf 13 Rozdíl v nejvyšší vnitřní teplotě vzduchu $\Delta\theta_{ai,max}$ – SIMULACE vs. BSim – varianta stínění



Graf 14 Rozdíl v nejvyšší vnitřní teplotě vzduchu $\Delta\theta_{ai,max}$ – SIMULACE vs. BSim – varianta přehřívání

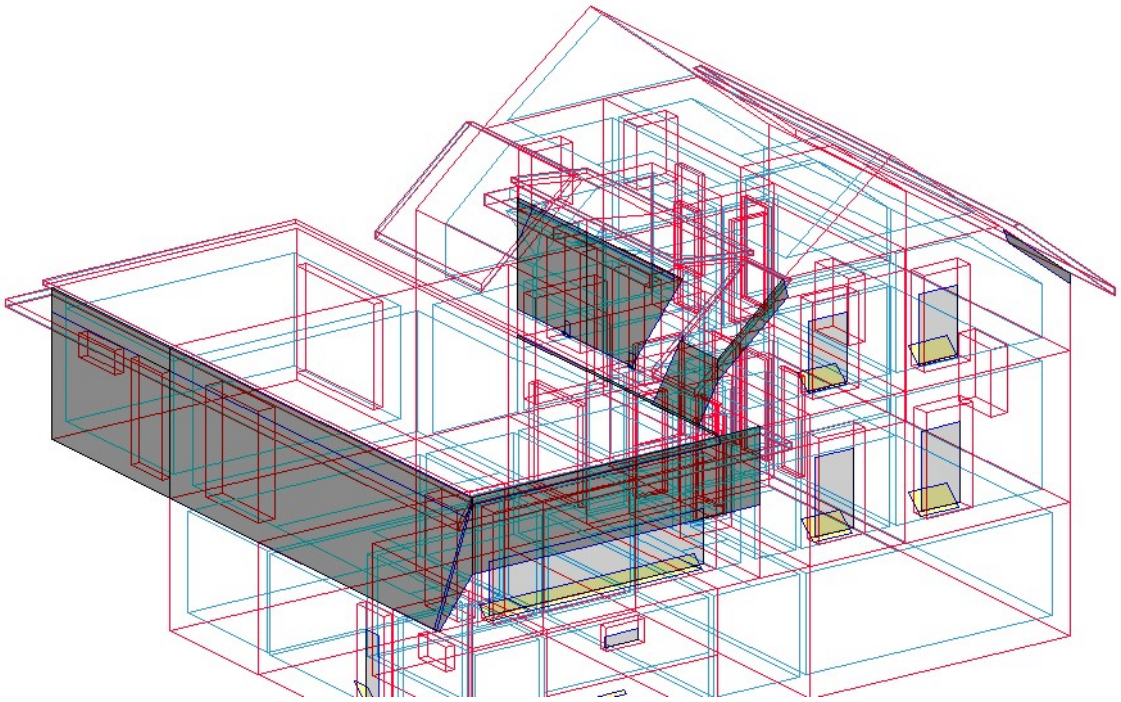
Graf 13 a Graf 14 ukazují samotný rozdíl ve výsledných hodnotách nejvyšší vnitřní teploty vzduchu mezi SIMULACÍ a BSim. Rozdíly $\Delta\theta_{ai,max}$ u stíněné varianty se žaluziemi pro dřevostavbu L1 a zděnou stavbu M2 jsou téměř totožné, pohybují se od cca 0,75 °C až po 2,2 °C. Zajímavý je fakt, že oba programy u varianty L2 dřevostavby oproti L1 a M2 poskytují výsledky více shodné. To samé platí pro variantu přehřívání, kdy jsou rozdíly ve výsledcích pro konstrukční systémy dřevostavby L1 a zděné stavby M2 obdobné a dřevostavba L2 se opět liší. Odlišné výsledky u varianty L2 oproti M1 a L1 jsou ovšem malé, proto by jim neměla býti věnována větší pozornost. Rozdílné výsledky $\theta_{ai,max}$ u přehřívané varianty pro konstrukční systémy L1 a M2 mezi BSim a SIMULACÍ jsou oproti variantě stíněné větší, pohybují se od 1,4 až po 3,4 - 4 °C.

Z výsledků je patrné, že se výstupní hodnoty $\theta_{ai,max}$ z obou programů značně liší. Pokud bychom porovnaly tyto rozdíly pro stíněnou variantu s intenzitou nočního větrání n 2–4 h^{-1}, která je obvykle u staveb lehce realizovatelná, pohybují se rozdíly v rozmezí 1,25–2 °C. Pokud se místnost začne přehřívat, jsou rozdíly mezi BSim a SIMULACÍ od 1,5 až do 4 °C. Rozdílné výsledky teploty $\theta_{ai,max}$ jsou mezi programy SIMULACE a BSim poměrně značné.

E.5.6 Diskuze rozdílů mezi SIMULACÍ a BSim

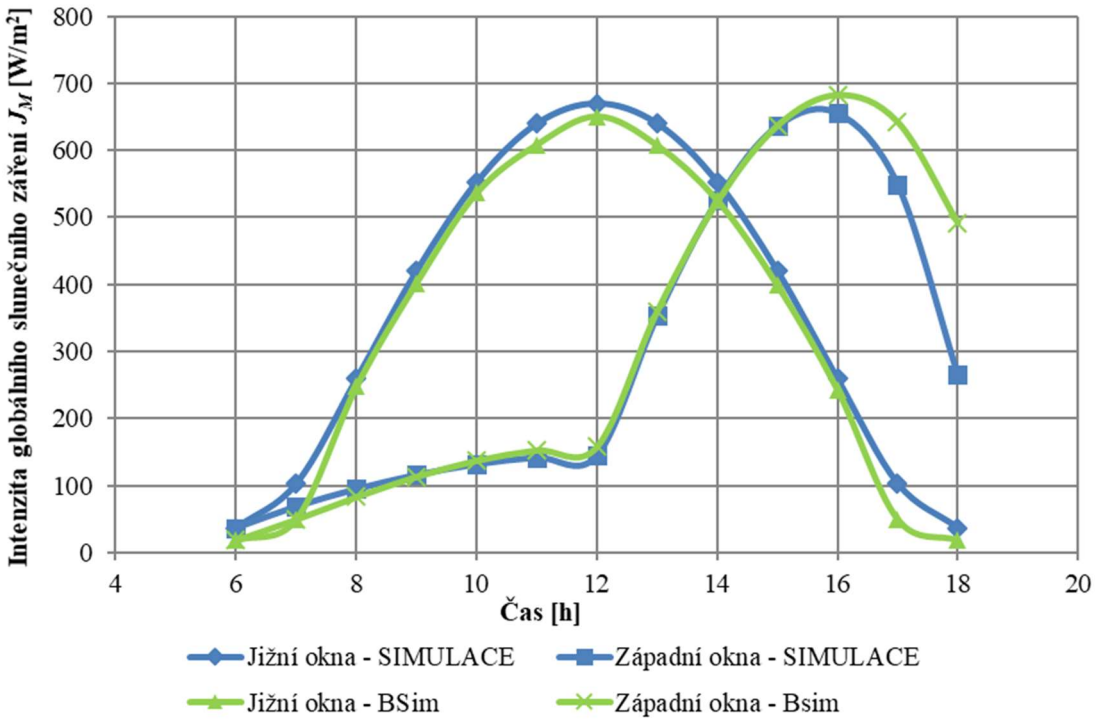
Možná příčina neshod výsledné teploty $\theta_{ai,max}$ se nehledá snadno. Je vhodné vyjít z předpokladu, že vnitřní teplotu ovlivňují nejvíce solární zisky, pokud se přes den příliš nevětrá. Rozdíl mezi BSim a SIMULACÍ tedy může být v solárních ziscích přes transparentní části stavby. Prostup tepla obalovými konstrukcemi vnitřní teplotu ovlivňuje minimálně.

Dříve uvedený Graf 10 ukazuje průběh teplot během dne u obou programů. Nárůst teploty do 9 hodin je obdobný. Do této doby ozařuje slunce jižní okno ve velkém úhlu, g hodnota skla v BSim je menší než daných 63 %. Od 10 hodin je g hodnota skel v BSim plných 63 % a teplota se oproti SIMULACI začne zvyšovat. SIMULACE zhruba od 13 hodin z neznámých důvodů zaznamenává výrazný pokles tepelných zisků a tudíž i teplota θ_{ai} tak dále nevzrůstá. Dle vizualizace z BSim jde ale přesto vidět, že ve 13 hodin přes jižní okna stále ještě svítí slunce (Obr. 19). SIMULACE zaznamenává nejvyšší zisky v 17–18 hodin. Naproti tomu BSim, přestože to potvrzuje vizualizace oslunění, zaznamenává maximum už v 16 hodin.



Obr. 19 Vizualizace RD Dubňany v BSim modulu XSun 21.srpna 13 hod.

Při hledání důvodů rozdílných výsledků bylo zjištěno, že možnou příčinou může být vstupní hodnota intenzity slunečního záření. U tabulky globálního záření J_M z ČSN 730540–3 [19] se totiž zdá, že jednotlivé sloupce pro různě orientované osluněné plochy nevycházejí ze základního sloupce pro vodorovnou plochu I,H, ale jsou mírně rozdílné. BSim intenzity pro ostatní jinak orientované plochy dopočítává ze sloupce I,H (Tabulka 2). Tedy z hodnot, které se normálně naměří pyranometrem přímo v dané lokalitě. Rozdíl zobrazuje Graf 15. Na jižní okna působí dle SIMULACE a BSim zhruba stejné množství slunečního záření. Dle BSim ale působí v 18 hodin na západní okna více slunečního záření než u SIMULACE. Zde naopak SIMULACE poskytuje překvapivě vyšší výsledky. Je tedy vidět, že předpoklad vyšších slunečních zisků u SIMULACE, které ovlivní vnitřní teplotu $\theta_{ai,max}$ se nepotvrdil. Paradoxně poskytuje SIMULACE vůči BSim opačné výsledky, než se dle slunečních zisků dá předpokládat.



Graf 15 Globální sluneční záření – SIMULACE vs BSim

E.5.7 Závěr srovnání SIMULACE vs. BSim

Výsledky z programů BSim a SIMULACE jsou rozdílné. Dynamika změn vnitřních teplot je sice rámcově podobná, každopádně absolutní výsledky se značně odlišují. Rozdíly ve vnitřní teplotě $\theta_{ai,max}$ pro standardní podmínky dosahují až 4 °C. Určitou roli v této rozdílnosti zřejmě hrají jiné sluneční zisky okny, potažmo jiné vstupní hodnoty slunečního záření pro výpočet. Dalším faktorem může být jiné stínění oken, kdy BSim počítá stínění oken přesahy střechy a ostěním zřejmě přesněji. Ve výsledcích může určitou roli hrát i proměnná hodnota propustnosti slunečního záření vlivem úhlu dopadu paprsků na sklo. Obecně, dle manuálů k oběma programům nejde s jistotou zjistit, jakým přesným postupem jsou sluneční zisky počítány. Dalším důležitým faktorem pro tuto práci je vliv tepelně akumulační hmoty. U SIMULACE není zcela transparentní postup výpočtu vnitřní tepelné akumulace konstrukcí a následně vliv na vnitřní teplotu θ_{ai}.

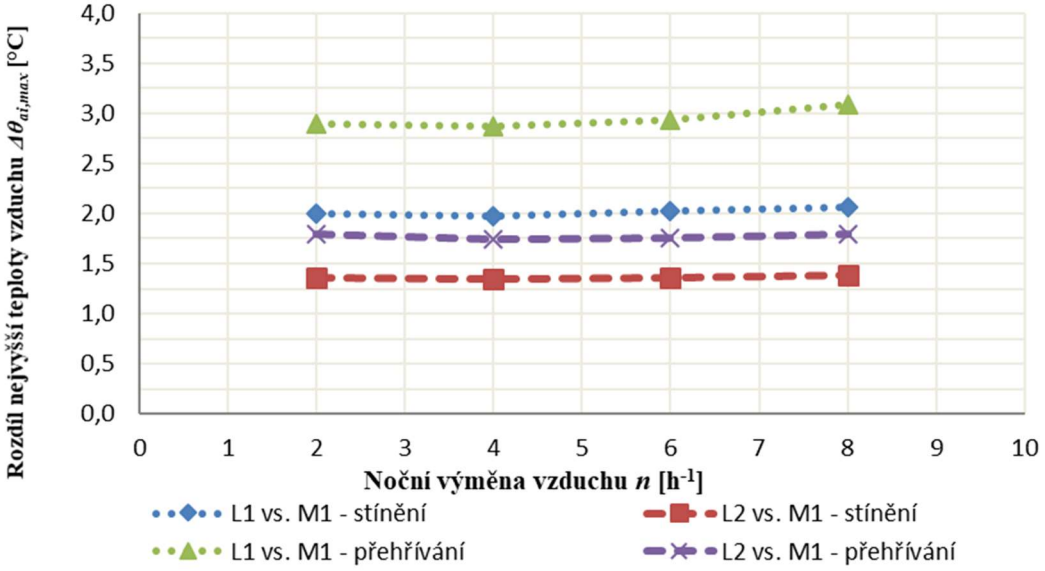
Přestože je BSim software, ve kterém se může namodelovat mnohem více okrajových podmínek, nedá se říci, zda je v tomto případě přesnější než SIMULACE. SIMULACE je nástroj zjednodušený, který popisuje přehřívání budovy zjednodušeně dle požadavků normy ČSN 730540–2 [5]. Zda může být BSim přesnější než SIMULACE,

může s největší přesností rozhodnout výpočet a porovnání dle verifikačních příkladů, které jsou uvedeny v ČSN EN ISO 13791 [17] a ČSN EN ISO 13792 [18].

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.

E.5.8 Výsledky srovnání konstrukčních variant v BSim

V předešlém textu byl popisován rozdíl mezi výsledky z programu SIMULACE a BSim. Dále budou popisovány výsledky z programu BSim a rozdíly mezi jednotlivými konstrukčními variantami RD Dubňany. Z dříve uvedených grafů, Graf 11 a Graf 12, můžeme pozorovat rozdíly mezi lehkou dřevostavbou L1, dřevostavbou L2 a zděnou stavbou M2. Graf 16 interpretuje výsledky jinak - jaký je rozdíl $\Delta\theta_{ai,max}$ obou dřevostaveb L1 a L2 vůči těžší zděné stavbě M2. V rámci kvazistacionárního výpočtu pro ověřovaný den 21. srpna je rozdíl vnitřních teplot $\Delta\theta_{ai,max}$ mezi dřevostavbou L1 a zděnou variantou zhruba 2 °C, při přehřívání je to zhruba necelé 3 °C. Rozdíl mezi dřevostavbou L2 s přidanou betonovou mazaninou a zděnou stavbou M2 je o něco menší, při stínění jižních oken je to zhruba 1,3 °C a při přehřívání zhruba 1,8 °C. Rozdíly v nejvyšší dosažené teplotě $\theta_{ai,max}$ mezi konstrukčními variantami tedy nejsou zanedbatelné. Rozdíly $\Delta\theta_{ai,max}$ nejsou příliš závislé na noční výměně vzduchu n.



Graf 16 Rozdíl nejvyšší vnitřní teploty vzduchu $\Delta\theta_{ai,max}$ pro různé konstrukční varianty - simulace BSim

E.5.9 Výsledky dlouhodobé simulace konstrukčních variant v BSim

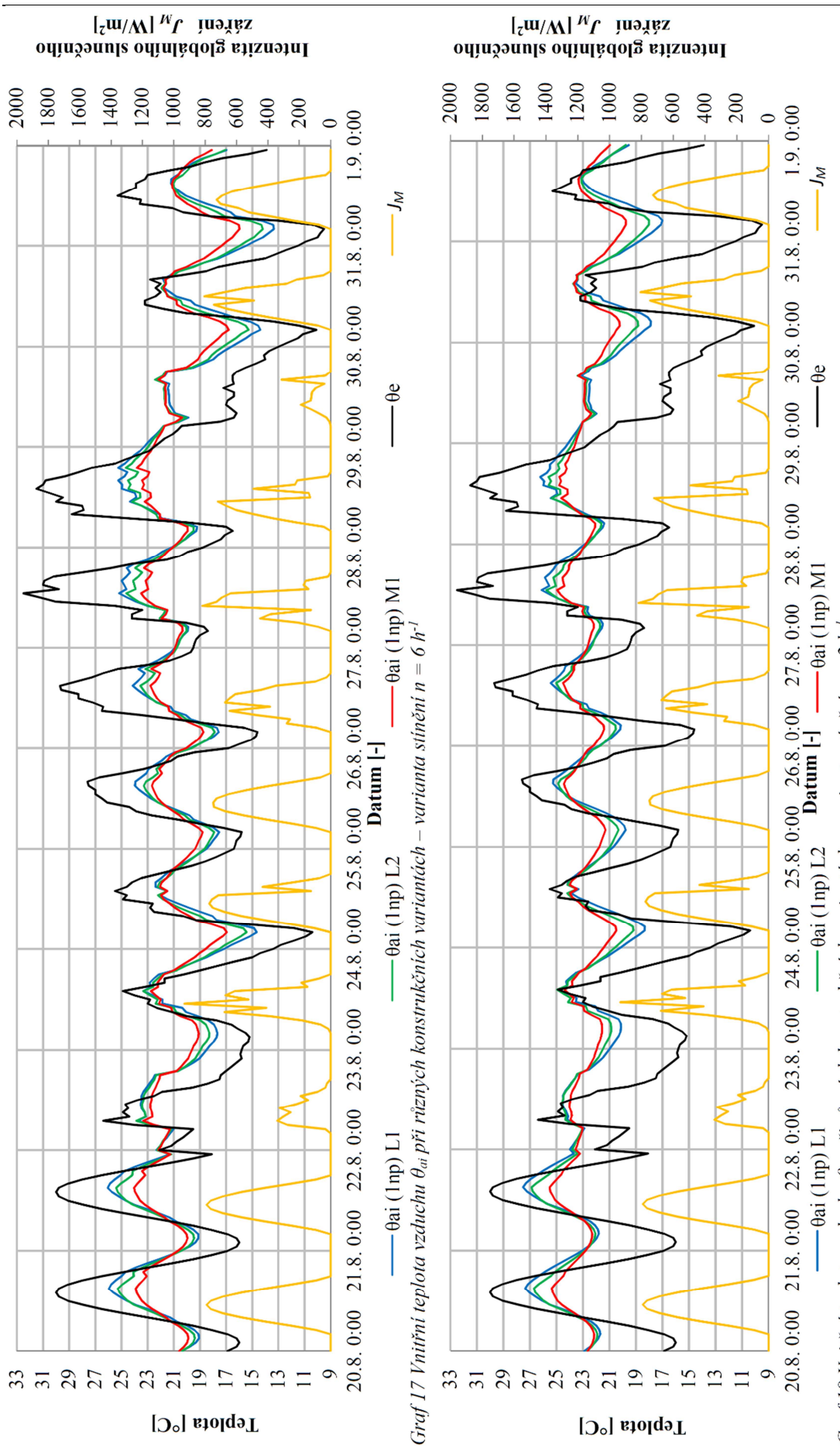
Samotné porovnání nejvyšší teploty $\theta_{ai,max}$ mezi dřevostavbou a zděnou stavbou není bez výhrady určující. Akumulační procesy při přehřívání stavby jsou dynamickým procesem, které nejsou snadno předvídatelné. Jestliže těžší zděná stavba předešla přehřátí akumulací tepla přes den, bude tuto energii uvolňovat v noci a v následujících dnech. Tento proces popisuje Graf 17 a Graf 18. Na grafech je vidět dlouhodobý průběh teplot při všech třech konstrukčních variantách L1, L2 a M2 při dynamické zátěži skutečnými klimatickými podmínkami během 12 dní.

Graf 17 zobrazuje průběh teplot u všech variant při násobnosti nočního větrání $n = 6\ h^{-1}$. Rozdíl teplot 20. a 21. srpna pro L1 a M2 je zhruba 2 °C. Při simulaci proběhlo před 21. srpnem již 5 stejných normových dnů, stavba je tedy značně tepelně naakumulovaná. Toto se projeví právě u stavby zděné, kdy 22. srpna jsou již rozdíly varianty L1 a M2 menší. 23. a 24. srpna jsou teploty u obou variant téměř totožné. Nadcházející dny již zděná stavba svoji tepelnou energii vydala a nadcházející 4 dny má oproti dřevostavbě L1 opět o zhruba 1,5 °C nižší teplotu. 29. až 31. srpna je zděná stavba opět tepelně naakumulovaná a teploty jsou u obou variant totožné. Akumulační dřevostavba L2 je výsledky zhruba napůl mezi variantou L1 a M2.

Graf 17 tedy zjednodušeně ukazuje, že po 4 dnech přehřívání, kdy má zděná stavba M2 o zhruba 1,5 °C nižní teplotu než dřevostavba L1, následují 2 normální dny, kdy má zděná stavba L2 teplotu θ_{ai} s dřevostavbou L1 obdobnou. Toto se dá zjednodušeně vyhodnotit tak, že efekt vyšší tepelné akumulace zděné stavby funguje jenom dočasně. Přesto však zděná stavba uplatňuje svoji tepelně akumulační schopnost, právě když je to potřeba a to při přehřívání. Dřevostavba je tepelně labilnější, při nižší tepelné zátěži teplota klesá rychleji než u stabilnější zděné stavby.

Předešlé rozdíly L1 a L2 byly při hodnotě nočního větrání $n = 6\ h^{-1}$. Je to relativně vyšší hodnota a je realizovatelná pouze u místností, kde se dá větrat příčně okny nebo se větrá komínovým efektem přes schodiště a 2.NP. Proto je zde Graf 18, který ukazuje průběh teplot při výměně vzduchu $2\ h^{-1}$. Tímto se reálně přibližuje místnostem, které lze větrat těžko (např. s jedním oknem).

Průběh teplot odpovídá principu ze základního grafu - Graf 17. Je zde však jeden významný rozdíl. Jelikož je intenzita větrání menší, nemohou se sluneční zisky u zděné varianty M2 vyvětrat přes noc. Proto se při normálních dnech sníží rozdíl varianty dřevostavby L1 a zděné stavby M2 z původních necelých 2 °C na 1 °C. Proto u méně větratelných místností a staveb, může být rozdíl mezi dřevostavbou a zděnou stavbou velmi malý. V potaz se musí vzít skutečnost, že varianta L1 přestavuje dřevostavbu bez téměř žádné akumulační hmoty. Varianta L2 s betonovou mazaninou se již ke zděné stavbě M2 přibližuje, mimo dny se stejnou teplotou, na rozdíl $\Delta\theta_{ai}$ 1,0 až 0,5 °C.



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

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

E.5.10 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 akumulační 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.

Pokud se vezme v úvahu reálnější výměna vzduchu 2 h^{-1}, v případě hůře větratelných místností, pohybuje se varianta dřevostavby L1 domu RD Dubňany při přehřívání okolo 27,5 °C, u zděné varianty M2 je to 25,5 °C, u akumulační dřevostavby je to 26,8 °C. Rozdíl mezi variantami L1 a M2 jsou stejné s tím rozdílem, že v případě normálních dnů se rozdíl mezi oběma konstrukčními systémy zmenšil na zhruba 1 °C.

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. Takovýchto staveb a místností není mnoho. Také varianta L1 představuje dřevostavbu poměrně lehkou, tudíž bez žádné akumulační hmoty. Proto se dá očekávat, že se rozdíl mezi konstrukčním systémem dřevostavby s alespoň malou akumulační hmotou a systémem tradiční zděné stavby u jiných staveb ještě zmenší. Varianta dřevostavby s betonovou mazaninou L2 se přehřívá oproti klasické zděné stavbě již méně – zhruba 0,5 – 0,75 °C. Naopak rozdíl se zřejmě zvětší, pokud budeme uvažovat těžší zděné stavby.

E.6 Měření letní tepelné stability pasivního RD Dubňany a simulace v BSim

E.6.1 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 E.5.

E.6.2 Popis měření

Předmětem simulace je skutečná stavba pasivní RD Dubňany. Podrobný popis stavby, konstrukcí, fotografií atd. je uveden v části E.4. Dům je řešen v energeticky pasivním standardu s nuceným větráním s rekuperací tepla. Konstrukční systém je tvořen lehkým dřevěným skeletem z I nosníků. Měření letní tepelné stability probíhalo ve dvou obytných místnostech. První místností byl obytný prostor pod plochou střechou v 1.NP. Druhým prostorem byla podkrovní místnost na JV rohu stavby.

Obr. 20 Letní měření RD Dubňany – obývací pokoj pod plochou střechou v 1.NP

Obr. 21 Letní měření RD Dubňany – podkrovní místnost vpravo nahoře

Specifikace měření:

objekt:	pasivní RD Dubňany
účel měření:	letní tepelná stabilita
datum:	27.7. - 30.7. 2012

Měřené hodnoty:

venkovní prostředí	venkovní teplota vzduchu θ_e, globální sluneční záření J_M
	teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} *(1np)*,
	teplota kulového teploměru θ_g *(1np)*,
obytný prostor 1. NP	vnější povrchová teplota stěny θ_p *(W_{ext} -1np),*
	vnitřní povrchová teplota stěny θ_p *(W_{int} -1np),*
	vnitřní povrchová teplota stropu θ_p *(R_{int} -1np)*
místnost v podkroví	teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} *(2np)*
měřicí přístroje:	jednoduché termočlánky Ni-Cr-Ni, povrchový kulový
	teploměr, dataloger ALMEMO 2890-9 - zápis po 1 min,
	teploměr-vlhkoměr Comet S3631 (podkroví)
další specifikace:	27.7. - náběh měření - neznámý stupeň naakumulování stavby
	28.7. 9-18 h – přehřívání - přesné měření, bez pobytu osob
	zbytek – běžné užívání – méně přesné měření, s pobytem osob

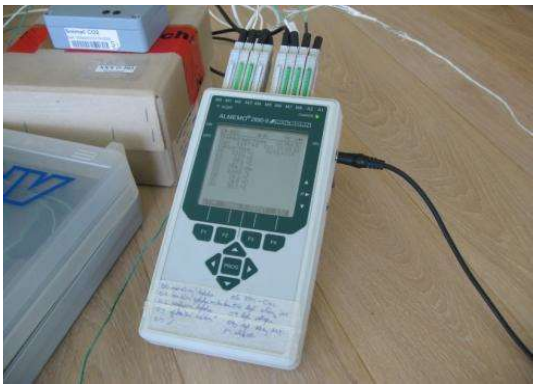
U obytného prostoru 1.NP byla měřena vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} *(1np)* termočlánkem a teplota kulového teploměru tímto teploměrem θ_g *(1np)* resp. operativní teplota θ_o *(1np)* (poblíž středu místnosti, v polovině výšky, mimo oslunění). Termočlánky měřili taktéž vnitřní povrchovou teplotu stěny θ_p *(W_{int} -1np)* (stěna na západě mezi okny, v polovině výšky) a střechy uprostřed místnosti θ_p *(R_{int} -1np)*. Dále byla měřena venkovní povrchová teplota fasády θ_p *(W_{ext} -1np)* bez zastínění čidla (taktéž západní fasáda naproti vnitřnímu termočlánku). V podkrovní místnosti byla měřena vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} *(2np)*.

Globální sluneční záření J_M bylo měřeno standardním pyranometrem. Pyranometr byl umístěn JZ rohu ploché střechy tak, že nebyl zastiňován předměty a domy. Venkovní teplotu θ_e měřil opět termočlánek zastíněný židlí na Z fasádě.

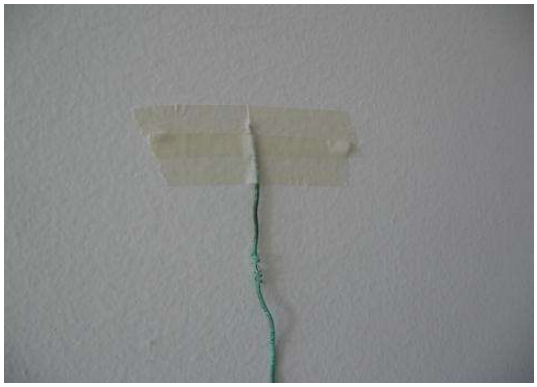
V pátek 27.7. odpoledne byla měřicí soustava nainstalována a probíhal náběh měření. Venkovní žaluzie byly z většiny staženy, v podkrovní místnosti byly žaluzie vytaženy. Větrání probíhalo přes vzduchotechniku napojenou na zemní kapalinový výměník. Do interiéru byla přiváděna teplota rovnající se zhruba teplotě v interiéru. V sobotu 28.8. probíhal hlavní měřící den. Cílem bylo místnosti co nejvíce přehřát. Tento den proběhl bez pobytu osob a provozu spotřebičů uvnitř stavby. V hlavní měřící den byla vzduchotechnika vypnuta. Žaluzie v obytném prostoru byly vytaženy. Další dny probíhalo měření bez přítomnosti autora za standardního užívání osobami.

Obr. 22 Letní měření RD Dubňany – instalace měřicího zařízení

Obr. 23 Letní měření RD Dubňany – kulový teploměr v obytném prostoru 1.NP



Obr. 24 Letní měření RD Dubňany – měřicí ústředna



Obr. 25 Letní měření RD Dubňany – termočlánek lepený na stěnu obytného prostoru 1.NP

Obr. 26 Letní měření RD Dubňany – měření teploty vzduchu v podkrovní místnosti

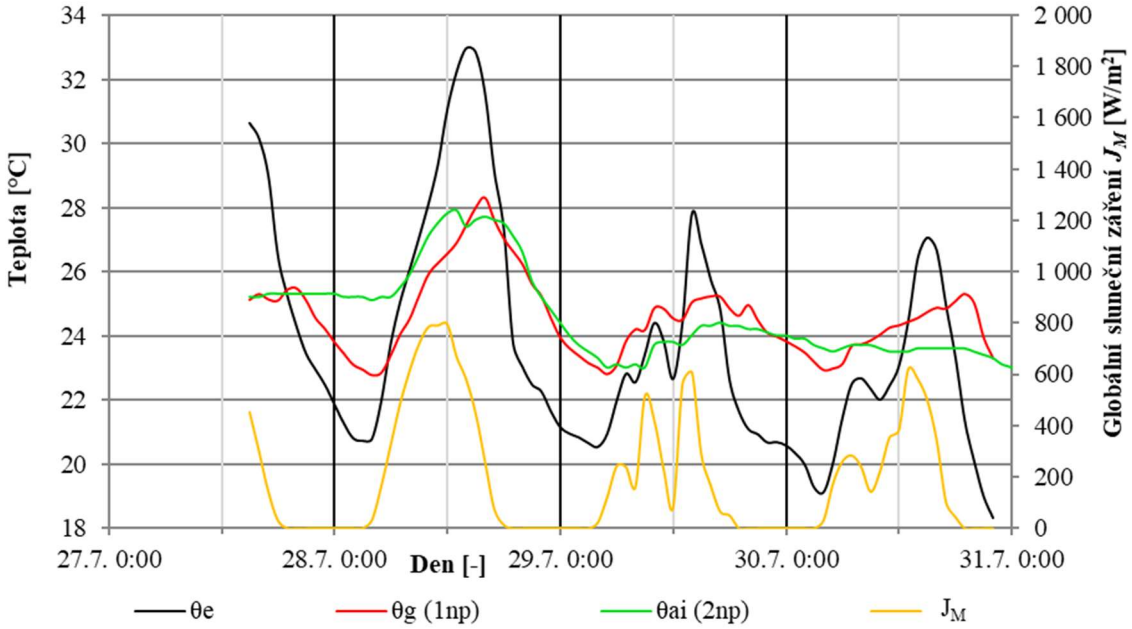
Obr. 27 Letní měření RD Dubňany – pyranometr usazený v kačírku na rohu ploché střechy

Obr. 28 Letní měření RD Dubňany – termočlánek lepený na fasádu

Obr. 29 Letní měření RD Dubňany – termočlánek venkovní teploty stíněný židlí

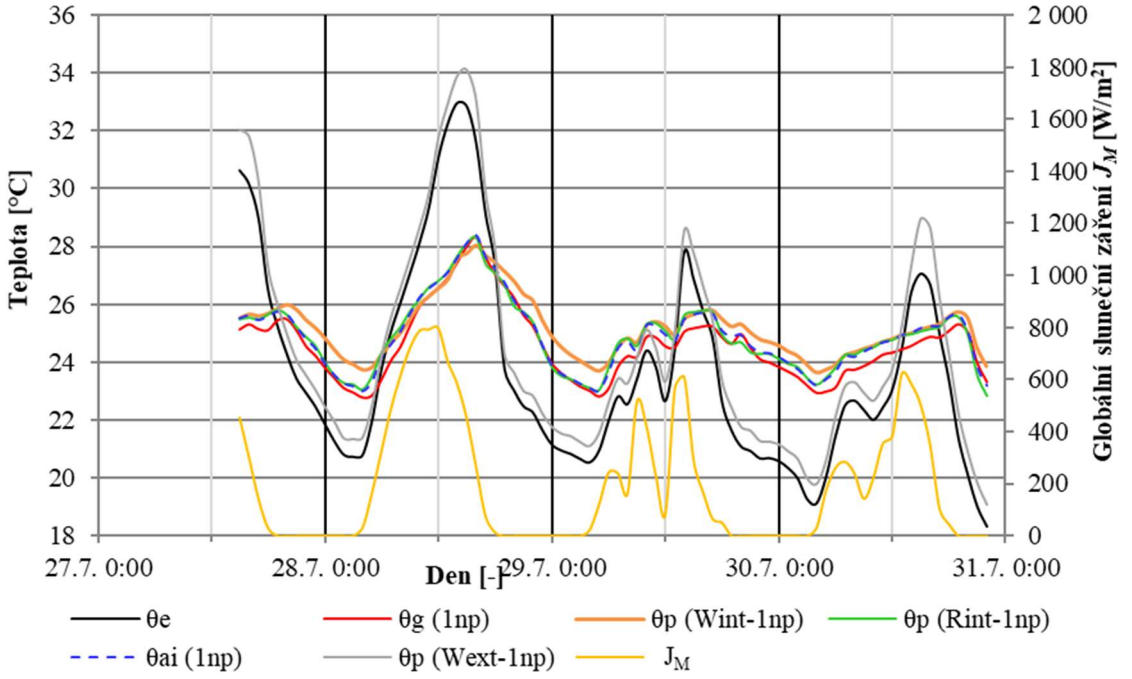
E.6.3 Výsledky

Při cíleném přehřívání domu bylo v sobotu 28.7. v obytném prostoru v 18:00 letního času (dále LT) dosaženo nejvyšší teploty kulového teploměru θ_g *(1np)* 28,3 °C, v podkroví ve 14:00 pak nejvyšší vnitřní teploty vzduchu θ_{ai} *(2np)* 27,9 °C (Graf 19). Venkovní nejvyšší teplota vzduchu θ_e byla 33 °C, nejvyšší globální sluneční záření J_M bylo 800 wattů. Při čisté nezatažené obloze dosahuje obvykle J_M ještě vyšší hodnoty, byl totiž mírný opar. V následujících dnech se již při zastínění žaluziemi pohybovaly teploty θ_{ai} *(1np) a (2np)* okolo 24 až 25 °C, sluneční zisky a venkovní teplota θ_e však již byly nižší. V této době se dá předpokládat, že byly vnitřní teploty ovlivněny naakumulovaným teplem v konstrukcích.



Graf 19 Letní měření RD Dubňany - vnitřní teploty u obytného prostoru 1.NP a podkrovní místnosti

Dále byla měřena vnitřní povrchová teplota stěny θ_p *(*W_{int} *-1np)* a stropu obytného prostoru θ_p *(*R_{int} *-1np)*. Obě teploty se pohybovaly zhruba o 0,5 °C výše než vnitřní teplota kulového teploměru θ_g *(1np)* (Graf 20). Mimo jiné byla měřena venkovní povrchová teplota osluněné stěny na západě θ_p *(*W_{ext} *-1np)*. Teplota je průměrně zhruba o 0,5 °C vyšší, než je samotná teplota venkovní stěny.



Graf 20 Letní měření RD Dubňany - teploty u obytného prostoru 1.NP

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

E.6.4 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 (viz část B.5.2 a B.5.7) nepřehřívala zcela extrémně (Graf 19). 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.

Dle stavebníka je v obytném prostoru standardně dosahováno v letním období teploty při denních špičkách cca 24°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.

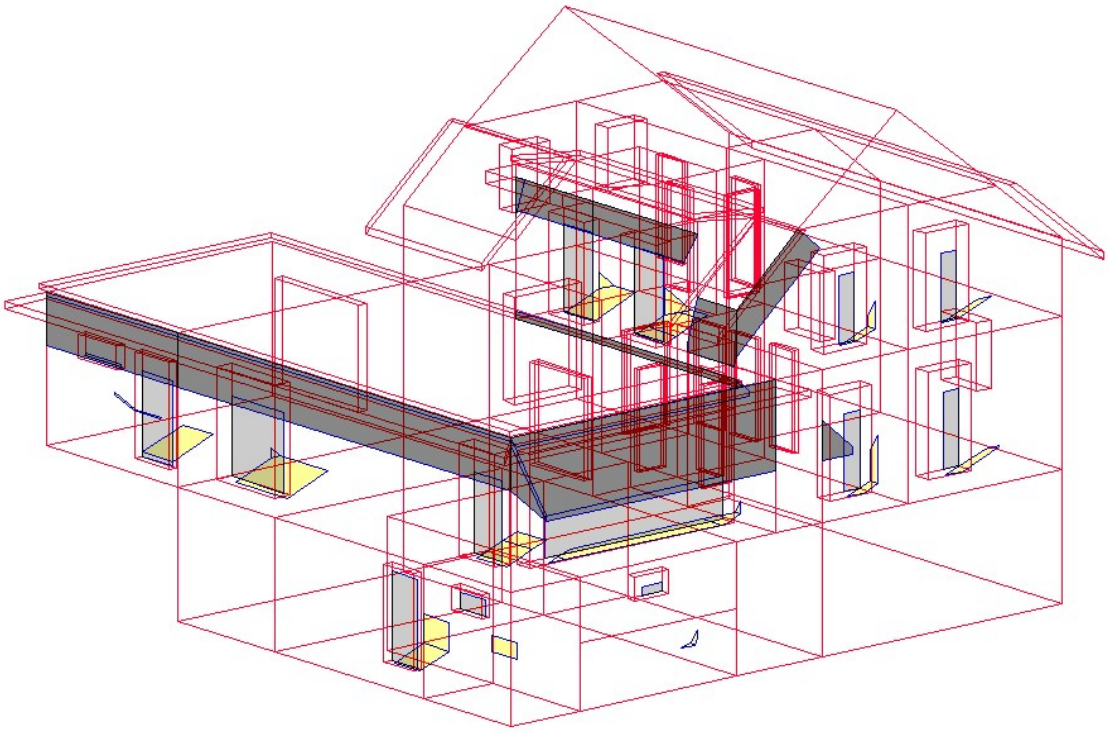
Jelikož mají obalové konstrukce pasivního domu vysokou hodnotu tepelného odporu, dá se předpokládat, že venkovní teplota θ_e nebude příliš ovlivňovat jejich vnitřní povrch. Graf 20 zobrazuje naměřené hodnoty vnitřních teplot. Vnitřní teplota vzduchu obývacího pokoje θ_{ai} *(1np)* a vnitřní povrchová teplota dvouplášťové střechy θ_p *(*R_{int} *-1np)* dosahují téměř identických hodnot. Vnitřní povrchová teplota obvodové stěny θ_p *(*W_{int} *- 1np)* dosahuje u nočního větrání již mírně vyšších teplot. Na obrázku je zobrazena i venkovní teplota θ_e, globální sluneční záření J_M a venkovní povrchová teplota stěny θ_p *(*W_{ext} *-1np)*.

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} (*1np*) a teploty kulového teploměru θ_g (*1np*), respektive operativní teploty θ_o. Za standardního stavu interiéru lze pro reprezentaci vnitřní teploty v letním období

u pasivních domů zjednodušeně používat jak vnitřní teplotu vzduchu θ_{ai}, tak operativní teplotu θ_o.

E.6.5 Popis srovnávací simulace

Chování domu bylo za stejných okrajových podmínek numericky simulováno ve výpočetním programu BSim 2000. Model domu byl vytvořen kompletní včetně všech místností a podsklepení. Dvouplášťové konstrukce byly modelovány jako jednoplášťové se spodním pláštěm. Model domu byl vytvořen kompletní včetně všech místností a podsklepení. Dvouplášťové konstrukce byly modelovány jako jednoplášťové se spodním pláštěm. Klimadata v podobě venkovní teploty a globálního slunečního J_M záření byly do BSim dosazeny z naměřených hodnot v hodinových zprůměrovaných hodnotách. Pro dny před simulací byl použit poměr difuzní složky slunečního záření 20 %. Pro měřené dny byl poměr difuzní složky sestaven speciálně pro každou hodinu. Užívání domu v tyto dny bylo simulováno dle popisu majitele domu.



Obr. 30 Letní simulace RD Dubňany – zobrazení slunečních tepelných zisků v BSim

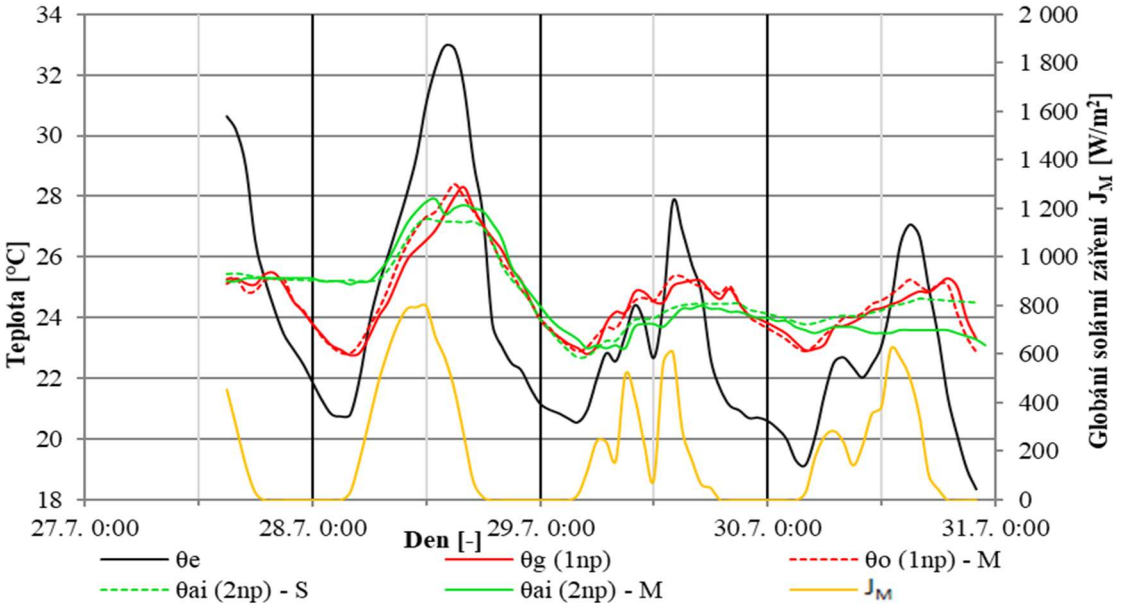
Větrání domu bylo popisováno násobností výměny vzduchu n. Přes den infiltrace v podobě n = 0,1 h^{-1}, přes noc pak v obytném prostoru při komínovém efektu větrání od 4 do 7 h^{-1} dle chování průběhu teploty zjištěné měřením. Vnitřní zdroje tepla byly

dosazeny v podobě stálého tepelného zatížení interiéru datalogerem a lednicí a mrazákem. Dále pak byla paušálně zadána zvýšená tepelná zátěž vlivem zapnutých elektrospotřebičů jako: LCD televizor, horkovzdušná trouba, sporák, mikrovlnná trouba. Do vnitřních zisků podkrovní místnosti bylo dosazeno 30 W příkonu.

Nastavení okrajových podmínek simulace v podobě větrání, vnitřních zisků a stínění tepla proběhlo i se zpětnou vazbou k naměřeným hodnotám zejména vnitřní teploty. Dosazené hodnoty větrání byly například poopraveny dle průběhu srovnání naměřené a simulované teploty. Kupříkladu, pokud bylo zjištěno, že výsledek simulace silně ovlivňuje výměna vzduchu a křivka nekoresponduje svým průběhem s naměřenou hodnotou, byla intenzita výměny vzduchu pro simulaci v přípustných mezích poopravena.

E.6.6 Výsledky srovnávací simulace

Srovnání výsledků měření a simulace vnitřní teploty v obytném prostoru ukazuje, že zde nejsou přílišné odchylky a teploty měřené a simulované (Graf 21). Je třeba zohlednit okrajové podmínky, se kterými bylo přistupováno k simulaci. Proto může být rozdíl mezi měřením a simulací větší. Přesto však simulovaná teplota svým průběhem odpovídá měřené teplotě a dobře s ní reaguje. Výstupy programu téměř ztotožňují vnitřní teplotu vzduchu θ_{ai} (*1np*) a operativní teplotu místnosti θ_o (*1np*) (není uvedeno v grafu). Průběh teploty 30.7. v podkrovní místnosti již úplně neodpovídá, jelikož do stínění okna může být v simulaci BSim zadán jenom jeden stínící součinitel. V pondělí stavebník domu stínil žaluziemi o poznání více, to nebylo v simulaci zohledněno.



Graf 21 Srovnání vnitřních teplot – měření vs simulace BSim – RD Dubňany

E.6.7 Závěr srovnávací simulace

Simulace programu BSim podává dobré výsledky ve srovnání s měřením stavby. Chování a dynamika změn simulace je podobná se skutečným chováním měřeného objektu. Kalibrovaná simulace bude dále sloužit pro provedení simulace konstrukčních variant.

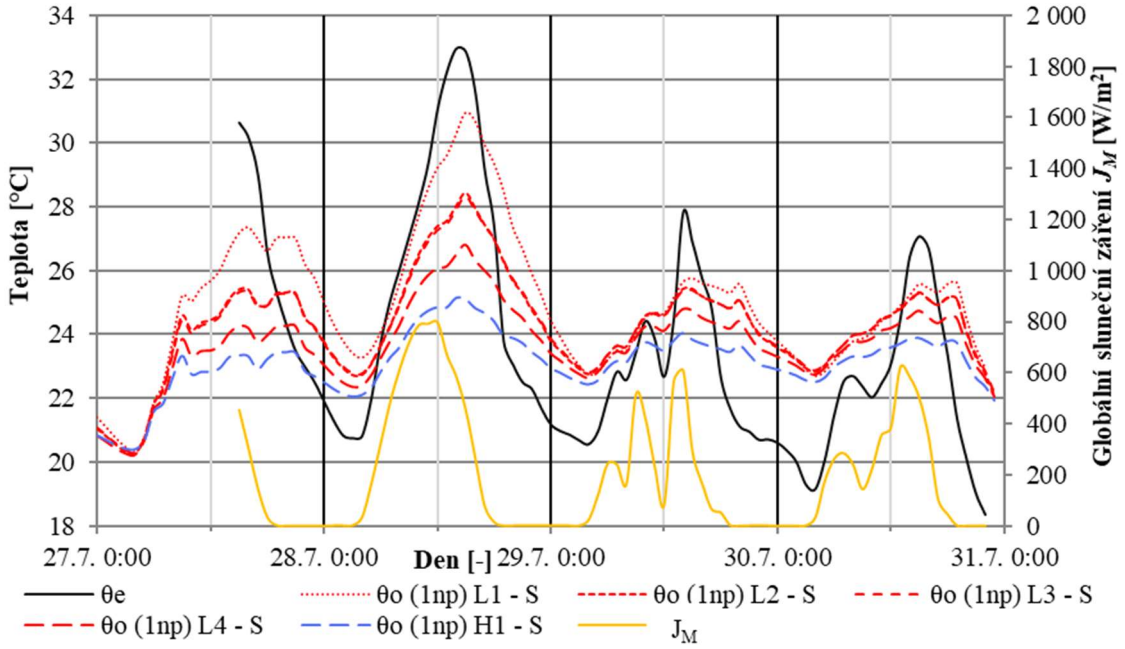
E.6.8 Popis simulace konstrukčních variant

Za předpokladu, že BSim poskytuje poměrně dobré výsledky při simulaci, bylo přistoupeno k variantní simulaci totožného přehřívání s použitím jiných konstrukčních variant. Varianty vycházejí ze skutečných konstrukcí (viz část E.5.3). Za konstrukční varianty byly zvoleny tyto:

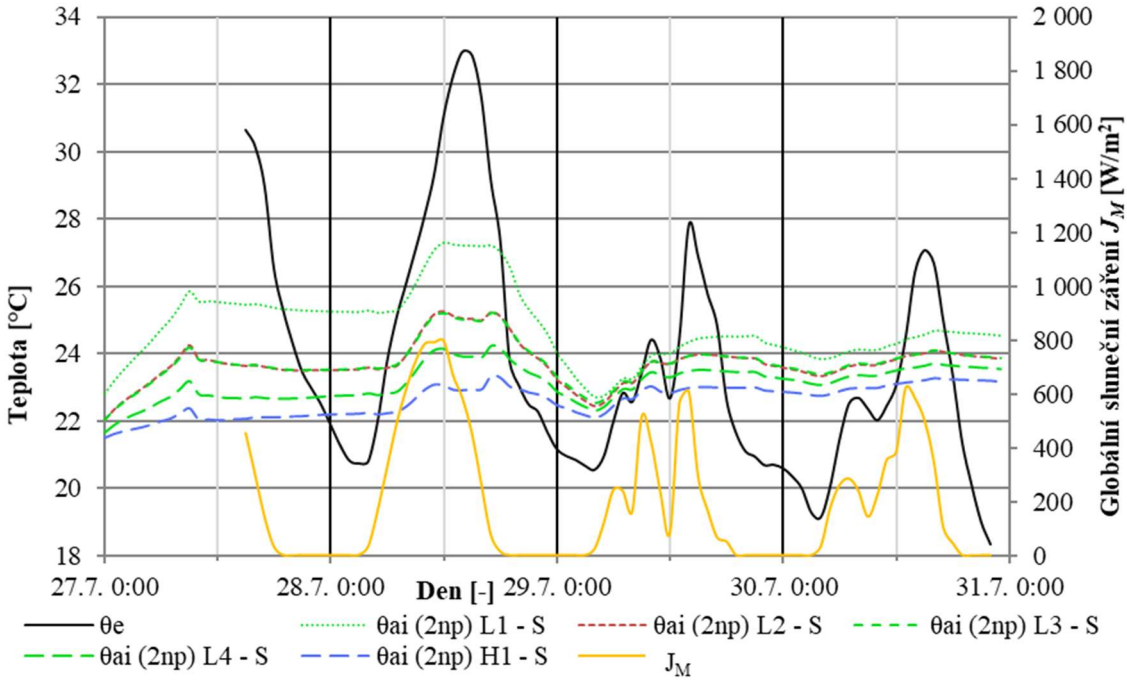
- L1 – skutečné konstrukce, bez příčky CPN
- L2 – skutečné konstrukce, s betonovou mazaninou 60 mm v podlaze
- L3 – varianta L2 + omítka 15 mm na vnitřní podélné stěně obýváku
- L4 – varianta L2 + vnitřní podélná stěna obýváku z CPN 150 mm
- H1 – VPC cihly 200 mm + EPS, ŽB stropy, střechy lehké (viz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

E.6.9 Výsledky simulace konstrukčních variant

Pokud srovnáme u obytného prostoru variantu nejlehčí a nejtěžší, rozdíl v nejvyšší dosažené teplotě interiéru θ_{ai} *(1np)* činí 5,9 °C (Graf 22). U nejlehčí varianty L1 bylo dosaženo teploty 31,0 °C, u nejtěžší varianty H1 to bylo 25,1 °C. Varianta L2 vykazuje teplotu 28,3 °C, varianta L3 překvapivě poskytuje stejné výsledky jako L2. Varianta L4 s výslednými 26,8 °C se přibližuje variantě H1.



Graf 22 Průběh vnitřních teplot u konstrukčních variant – simulace BSim (obytný prostor 1.NP)



Graf 23 Průběh vnitřních teplot u konstrukčních variant – simulace BSim (podkrovní místnost)

U simulace podkrovní místnosti se výsledky opakují. Mezi nejlehčí a nejtěžší variantou je rozdíl 4,1 °C. Jelikož varianta L1 zastupuje skutečné provedení stavby, je výsledek s 27,3 °C totožný. Varianta L2 a L3 poskytují stejné výsledky s hodnotou cca 25,3 °C. Varianta L4 pak 24,2 a varianta H1 23,2 °C.

Ze získaných hodnot pro různé varianty lze pozorovat, že s přírůstkem vnitřní tepelně akumulační hmoty se efektivně snižuje nejvyšší dosažená teplota v interiéru θ_{ai}. Lze to sledovat zejména na variantě L4 při přehřívání 28.7. Dosažení stejné výsledné teploty mezi L2 a L3 si můžeme vysvětlit pouze tím, že z hlediska hmotnosti, omítka na vnitřní stěně navíc k betonové mazanině v podlaze, neznamená podstatný nárust tepelné akumulace místnosti. Tento nesourodý výsledek však nebyl dále zkoumán. Mimo přehřívané dny se rozdíl mezi zděnou stavbou a dřevostavbami opět mírně snižuje. U podkroví pozorujeme obdobné výsledky. V případě dnů při normálním užívání jsou rozdíly variant L1 a H1 pouze necelé 2 °C. Rozdíly standardní dřevostavby s betonovou mazaninou v podlaze L2 a velmi těžké zděné stavby H1 jsou potom rozdíly zhruba 1 °C.

E.6.10 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 akumulační hmotou.

E.7 Simulace faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu

E.7.1 Cíl simulace

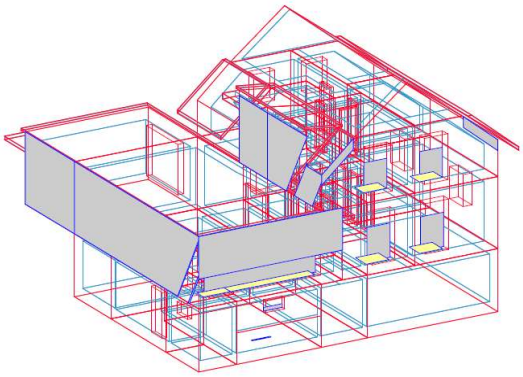
Bude provedena variantní simulace letní tepelné stability pasivního RD Dubňany. Simulace bude ve variantách zohledňovat jednotlivé faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu. Simulace bude vycházet z provedeného měření, respektive simulace letní teplené stability v tomto objektu E.6. Výsledky simulace budou sloužit pro srovnání a vyhodnocení jednotlivých faktorů ovlivňujících letní tepelnou stabilitu.

E.7.2 Popis simulace

Za vzorový příklad byl vzat úsek z již zmiňovaného měření, respektive simulace letní tepelné stability obývacího pokoje 1.NP pasivní dřevostavby v Dubňanech (Obr. 31). Klimatická data v podobě venkovní teploty a slunečního záření byla vložena do simulačního softwaru BSim 2000 (Obr. 32). Simulace je v základě stejná jako simulace v části E.6.6. Simulace byla provedena v těchto základních režimech:

- *01 θ_{ai} základ-dřevo*: základní varianta pasivní dřevostavby
- *02 θ_{ai} bez stínění*: vyšší solární zisky (bez stínění)
- *03 θ_{ai} bez přesahu*: vyšší solární zisky (bez přesahu střechy)
- *04 θ_{ai} U norma*: konstrukce s nižším součinitelem prostupu tepla (normové)
- *05 θ_{ai} vent 0,1/2*: větrání ve špatných režimech (přes den)
- *06 θ_{ai} vent 2/2*: větrání ve špatných režimech (přes den i noc)
- *07 θ_{ai} zděná*: konstrukčně těžší systém (zděná stavba)
- *08 θ_{ai} těžká zděná*: konstrukčně těžší systém (těžká zděná stavba)
- *09 θ_{ai} bez vnitř. zisků*: bez vnitřních tepelných zisků

Obr. 31 Pasivní RD Dubňany – obytný prostor pod plochou střechou 1.NP



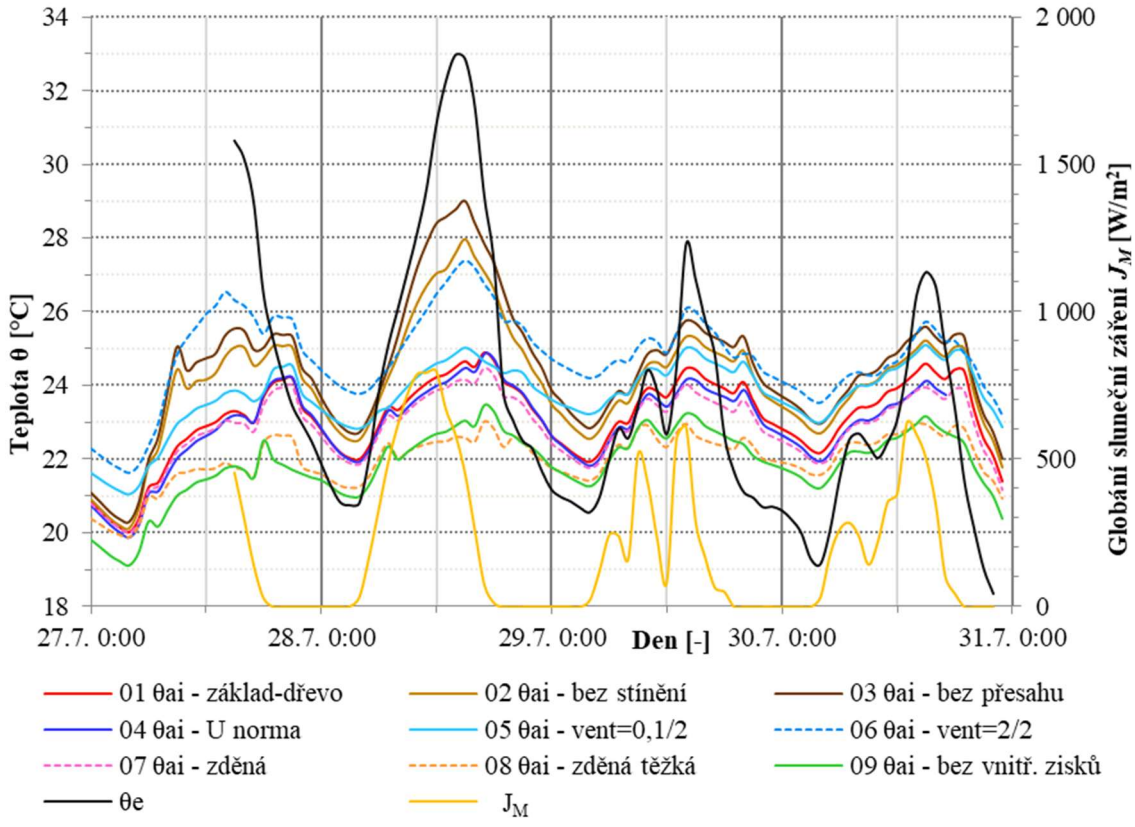
Obr. 32 Pasivní RD Dubňany – vizualizace objektu v programu BSim

Základní variantou je simulace místnosti v konstrukci sendvičové dřevostavby (varianta *01 θ_{ai} – základ-dřevo*). Okna byla stíněna venkovními žaluziemi. Byly uvažovány vnitřní zisky od osob a spotřebičů dle skutečnosti při měření. Větrání bylo voleno přes den s násobností výměny vzduchu n = 0,1 h^{-1} a v noci s proměnným, pro každou variantu ve stejném čase vždy stejným, větráním n = 3 – 6 h^{-1} (většinou 4 – 5 h^{-1}). Přechod denního a nočního větrání byl stanoven ráno většinou mezi hodinami 7:00 – 8:00, večer většinou mezi hodinami 19:00 – 20:00. Noční větrání odpovídá dobře větratelnému prostoru s možností příčného provětrání a zhruba odpovídá i větrání při měření zmiňované stavby. Přestože je minimální hygienická výměna vzduchu pro obytné stavby stanovena v rozmezí n = 0,3 – 0,5 h^{-1}, hodnota n = 0,1 h^{-1} postihuje stav, kdy není častokrát ve všední dny dům přes den obýván a není tak ani záměrně větrán. A to kvůli nechtěnému zvyšování teploty interiéru vlivem infiltrace venkovního, téměř vždy, teplejšího vzduchu. Takovéto spojení denního a nočního větrání také postihuje nejpříznivější situaci ve smyslu teploty místnosti.

E.7.3 Výsledky

Graf 24 popisuje míru vlivu výše jmenovaných faktorů na vnitřní teplotu vzduchu θ_{ai}. Základní varianta *01 θ_{ai} – základ-dřevo* je uvažována jako srovnávací hladina pro další simulované varianty. Pokud oproti základní variantě nebudou okna stíněna venkovními žaluziemi, vzroste vnitřní teplota pro polojasné dny v denních špičkách o 1 – 2 °C *(varianta 02 θ_{ai} – bez stínění)*, v jasných dnech až o 3 °C nebo více (28. 7.). Jestliže nebude ještě k tomuto uvažován efektivně stínící konstrukční přesah ploché střechy, vzrůstá vnitřní teplota oproti základu podle míry oblačnosti o 1 °C až 4,5 °*C (varianta 03 θ_{ai} – bez přesahu)*. V další variantě je nastíněn případ, kdy venkovní obalové konstrukce

místnosti budou mít pouze normové hodnoty součinitele prostupu tepla *U*, a to stěna - 0,3 W/(m^{2}·K) a plochá střecha 0,24 W/(m^{2}·K) *(varianta 04 θ_{ai} – U norma)*. Vzniká zde určitý paradox, kdy má být přes tyto konstrukce nepochybně větší tepelný prostup, avšak vnitřní teplota je oproti základní variantě stejná nebo dokonce mírně nižší. Model místnosti lze vytvořit v softwaru BSim 2000 pouze z vnějších rozměrů, proto při výrazném snížení tloušťky tepelné izolace nově vzniká v místnosti cca 20 m^{2} plochy konstrukcí s akumulační schopností. Prostup tepla obálkou budovy včetně fázového posunu je i při zmenšení tepelné izolace natolik malý, že nově vzniklá přídavná tepelná akumulace místnosti tyto tepelné zisky převáží. Je patrné, že tepelné zisky vnějšími neprůsvitnými konstrukcemi místnosti ovlivňují vnitřní teplotu oproti ziskům přes průsvitné konstrukce velmi málo.



Graf 24 Vliv různých faktorů na vnitřní teplotu vzduchu θ_{ai} - simulace BSim

V případě, že není možnost místnost v nočních hodinách řádně větrat, nemůže se ani předchlazovat na další den (varianta *05 θ_{ai} – vent=0,1/2*). S noční výměnou vzduchu n = 2 h^{-1}, což není často nijak výjimečný stav, se zvýší vnitřní teplota v denních špičkách oproti základu zhruba o 0,5 °C. Mimo denní špičky, jsou rozdíly ještě větší. V případě téměř žádného nočního větrání by se rozdíly opět zvyšovaly. Pokud se naopak bude větrat

i přes den s výměnou vzduchu $n = 2\ h^{-1}$, vpouští se do interiéru teplý vzduch a teplota se, nejenom v denních špičkách, výrazně zvyšuje v mezích 1 – 2,5 °C (varianta *06 θ_{ai} – vent=2/2*). V další, pro téma této práce aktuální, variantě se provede zvýšení vnitřní tepelně akumulační hmoty změnou lehkého sendvičového stavebního systému za těžší zděnou stavbu z keramických lehčených tvarovek s keramickým stropem (varianta *07 θ_{ai} – zděná lehká*). Teploty obou konstrukčních variant jsou velmi podobné s nejvyšším rozdílem v denních špičkách do 0,5 °C. Další variantu s téměř nejvyšší možnou hmotností představuje vápenopískové zdivo s ŽB stropem (varianta *08 θ_{ai} – zděná těžká*). Rozdíl ve vnitřní teplotě oproti základní variantě zde vzrůstá na 1 – 1,5 °C. Skladby u všech posuzovaných konstrukčních variant byly zadány do simulace ve zhruba stejných tloušťkách, vnitřní plocha místnosti se tedy neměnila. Všechny předešlé varianty jsou vyhotoveny s vnitřními zisky od osob a spotřebičů na úrovni 120 W a ve večerních hodinách nárazově až 500 W. Tyto tepelné zisky byly v další variantě vynechány (varianta *09 θ_{ai} – bez int. zisků*). Pokles vnitřní teploty oproti základní variantě je o 1 – 1,5 °C.

E.7.4 Závěr simulace faktorů

Výše uvedené výsledky poskytují základní představu o tom, jaký vliv může mít daný faktor na vnitřní teplotu místnosti θ_{ai}. Všechny simulované varianty byly pečlivě voleny tak, aby postihly co nejvíce kritických kombinací daného faktoru. Z variant v simulaci lze výsledné teploty interiéru při jiných změnách daného faktoru částečně také odvozovat. Vliv faktorů je demonstrován na konkrétní stavbě, dají se z nich přesto vyvozovat obecné závěry. Z provedené simulace lze konstatovat, že vliv tepelných zisků daného faktoru ovlivňuje vnitřní teplotu následovně v pořadí od největšího po nejmenší:

1. Největší vliv má prostup slunečního záření a tepla přes průsvitné části obálky budovy – velikost oken, konstrukční stínění a stínicí technika:

Faktor způsobí vyšší teplotu místnosti oproti základu až o 4,5 °C.

2. Vliv a možnost větrání místnosti přes den i noc;

Faktor způsobí vyšší teplotu místnosti oproti základu až o 2,5 °C. Vliv může být potencionálně ještě větší, pokud bude režim větrání ještě méně ideální.

3. Vnitřní tepelné zisky z osob a spotřebičů

Faktor způsobí vyšší, resp. nižší teplotu místnosti oproti základu až o 1,5 °C. Vliv může být potencionálně ještě větší, pokud vnitřní zisky nebudou tak nízké.

4. Vliv vnitřní tepelné akumulace v podobě typu konstrukčního řešení

Faktor způsobí vyšší, resp. nižší teplotu místnosti oproti základu až o 1,5 °C. Vliv se zdá být ještě o trochu menší, než předešlý faktor.

5. Vliv prostupu tepla neprůsvitnými konstrukcemi

Tento faktor s ohledem na ostatní faktory, zjednodušeně řečeno, ovlivňuje vnitřní teplotu místnosti velmi málo. Konstatování platí pro pasivní domy, kde mají obalové konstrukce vysoký tepelný odpor.

Interpretace výsledků je určitým zjednodušením a je uvažována s ohledem na reálně možné nepříznivé ovlivnění teploty místnosti daným faktorem.

E.8 Měření zimní tepelné stability RD Dubňany a simulace v BSim

E.8.1 Cíl měření a simulace

Bude provedeno dlouhodobé měření zimní tepelné stability pasivního objektu RD Dubňany. Na základě tohoto měření bude následně provedena srovnávací simulace ve výpočtovém programu BSim. Bude provedena simulace variant konstrukčních systémů. Cílem je zejména vyhodnotit vliv vnitřní tepelné akumulace na vychládání místnosti.

E.8.2 Popis měření

Předmětem měření je skutečná stavba pasivní RD Dubňany. Podrobný popis stavby, konstrukcí, fotografií atd. je uveden v části E.4. Dům je řešen v energeticky pasivním standardu s nuceným větráním s rekuperací tepla. Konstrukční systém je tvořen lehkým dřevěným skeletem z I nosníků. Měřena byla pracovna v podkroví s oknem na J a Z. Měřicí přístroje a postup měření byly voleny obdobně jako u měření letního přehřívání (viz část E.6.2). V pátek 16.3. večer byla měřicí soustava nainstalována a probíhal náběh měření. Dům byl standardně užíván, venkovní žaluzie byly částečně staženy, větrání probíhalo přes vzduchotechniku. Od soboty probíhalo hlavní měření, dům nebyl od rána 17.3. až do večera 23.3. obýván. Teplota v 1.NP byla řízena termostatem, kdy byla udržována na 17 °C. Podkroví vytápěno nebylo, chodba však měla možnost být relativně hodně penetrována teplým vzduchem z 1.NP. Vzduchotechnika byla vypnuta.

Obr. 33 Zimní měření RD Dubňany – podkrovní místnost JZ – západní okno

Obr. 34 Zimní měření RD Dubňany – podkrovní místnost JZ - vlevo nahoře

Specifikace měření:

objekt:	pasivní RD Dubňany
účel měření:	zimní tepelná stabilita
datum:	16.3. - 24.3. 2013

Měřené hodnoty:

venkovní prostředí	venkovní teplota vzduchu θ_e,
	globální sluneční záření J_M
podkrovní místnost JZ	teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} *(2np)*,
	vnitřní povrch. teplota zasklení okna na J θ_p *(WIN$_{int}$ -2np),*
měřicí přístroje:	jednoduché termočlánky Ni-Cr-Ni, kulový teploměr,
	dataloger ALMEMO 2890-9 - zápis po 5 min,
další specifikace:	16.3. - náběh měření - neznámý stupeň naakumulování stavby
	17.3. ráno – 23.3. večer - vychládání - přesné měření, bez pobytu osob
	zbytek – běžné užívání – méně přesné měření, s pobytem osob

Byla provedena srovnávací simulace vychládání v BSim. Dále pak byla provedena simulace konstrukčních variant, a to:

L1 – skutečné provedení dřevostavby (přidaný navíc anhydrit v podlaze 1.NP)

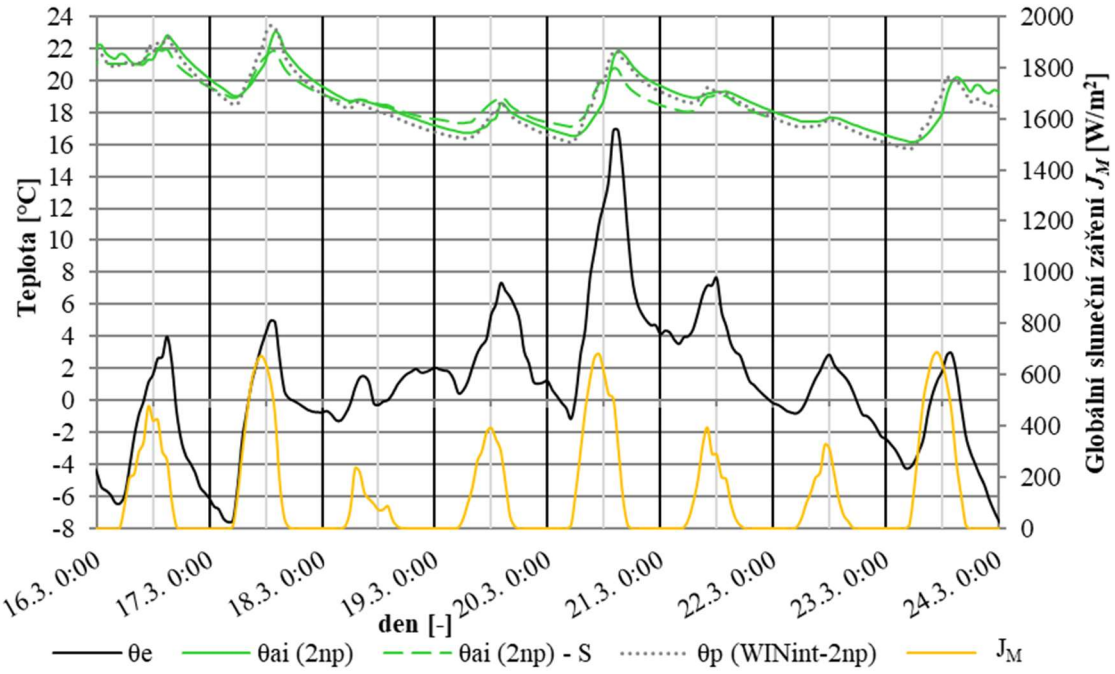
H1 – zděná stavba – VPC cihly 200 mm, ŽB stropy, střechy lehké

Byly simulovány 3 místnosti - pracovna v 1.NP na SV (1np), místnost v podkroví na SV (2.1np), pokoj v podkroví na JZ (měřená místnost - 2np).

E.8.3 Výsledky měření a srovnávací simulace

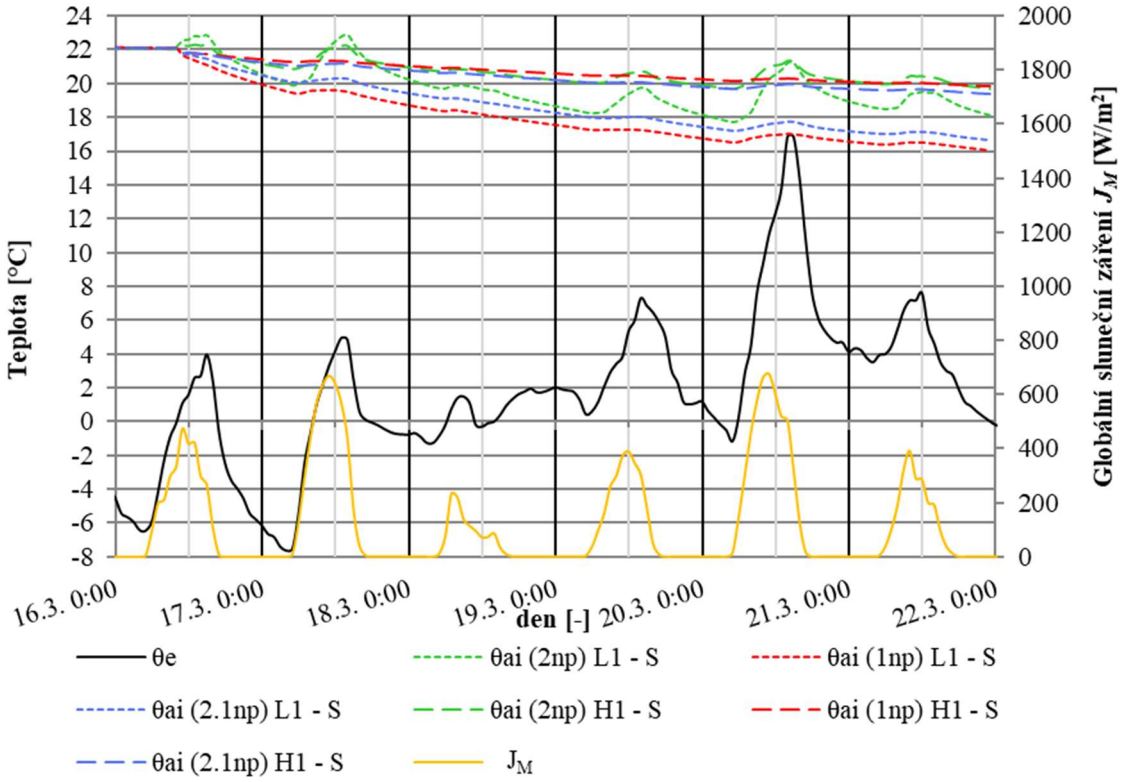
Na začátku vychládání 17.3. byla počáteční nejvyšší teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} cca 19,0 °C ráno, a odpoledne 23,0 °C (Graf 25). Jelikož se nevytápělo, místnost začala pomalu snižovat svoji teplotu θ_{ai}. Bez výrazných solárních zisků stavba vychládla za 3 dny až na noční teplotu 16,5 °C. 20.3. denní teplota výrazně stoupla nahoru vlivem teplého dne se slunečními zisky až na 22 °C. Další dny teplota opět mírně klesala.

23.3 celkem teplota klesla na noční tepotu 16 °C a denní 20 °C. Za 6 dní celkem teplota klesla o 3 °C, to je 0,5 °C za den. Venkovní teplota θ_e se v průměru pohybovala spíše mírně nad nulou. Dále byla měřena teplota na vnitřní straně skla okna na J θ_p *(WIN$_{int}$ - 2np)*. Z důvodů vysoké izolační schopnosti skel se povrchová teplota téměř shoduje s vnitřní teplotou.



Graf 25 Zimní měření RD Dubňany – vychládání podkrovního pokoje JZ

Provedená simulace vychládání poskytuje obdobné výsledky. Simulované teploty se odchylují od naměřených hodnot max. o 1 °C. Na tomto základě byla základní konstrukční varianta L1 doplněna o variantu těžké zděné stavby H1. Z výsledného grafu je patrné, že dřevostavba L1 vychládá více než těžká zděná stavba H1 (Graf 26). Na konci vychládání 23.3. je nejmenší rozdíl cca 2 °C mezi konstrukčními variantami L1 a H1 právě pro měřený podkrovní pokoj na JZ a největší cca 4 °C u pracovny 1.NP. V celkovém pohledu tak zděná stavba H1 vychladla z 22 °C na 19,75 °C, tedy o 2,25 °C. Dřevostavba L1 pak vychladla v průměru z 22 °C na 17 °C, tedy o 5 °C.



Graf 26 Vychládání místností RD Dubňany u konstrukčních variant – simulace BSim

Legenda: 1np – pracovna v 1.NP na SV, 2np - pokoj v podkroví na JZ (měřená místnost), 2.1np - místnost v podkroví na SV

E.8.4 Závěr

Měření a simulace dokazují, že pasivní RD Dubňany, ale i pasivní domy obecně, jsou v zimě velmi tepelně stabilní. V reálných poměrech podkrovní pokoj vychladl za 6 dní o 3 °C. Důležitou roli v tomto hrají opět sluneční tepelné zisky. Simulace naznačují, že pokud nemá místnost sluneční zisky, klesla by teplota spíše až o 5 °C. Výsledky popisují lehký konstrukční systém L1. Pakliže bude místnost těžká, klesne teplota bez ohledu na sluneční zisky o cca 2°C.

Podle části B.5.6 je nejdelší otopná přestávka stavby určena poklesem teploty o 3 resp. 4 °C. K tomuto poklesu u pasivních staveb prakticky nedojde i po několikadenním období. V hodnocení zanedbáme vliv vyšší venkovní teploty θ_e při měření. Na druhou stranu mají stavby při svém denním provozu vnitřní tepelné zisky, které při měření nebyly. Dnešní obytné stavby prakticky nemají otopné přestávky delší než noc, nanejvýše jeden den. Volba stavebního systému v rámci tepelně akumulační schopnosti stavby prakticky nehraje podstatnou roli.

F Tepelná akumulace – pokračování

F.1 Vnitřní tepelná akumulace pasivních domů – základní princip

Stavba a její místnosti jsou namáhány tepelnou zátěží v podobě venkovní teploty a slunečního záření a vnitřními tepelnými zisky. Je nutno poznamenat, že se problematika tepelného namáhání místnosti obalovými konstrukcemi u pasivních domů poměrně zjednodušuje. Masivní tepelná izolace z vnější strany způsobuje, že jsou vnitřní vrstvy této konstrukce velmi dobře tepelně izolovány od vnějšího prostředí. Tento stav se částečně přibližuje adiabatické podmínce, kde by nebyla s venkovním prostředím přes obalové konstrukce vyměňována žádná tepelná energie. Pakliže jsou vnitřní vrstvy obalových konstrukcí tepelně izolované od vnějšího prostředí, mohou být započítány do vnitřní tepelné akumulace stavby, respektive místnosti. Vnitřní konstrukce jsou samozřejmě integrální součástí stavby a taktéž patří do vnitřní tepelné akumulace stavby.

F.2 Periodická penetrační hloubka δ a plošná tepelná kapacita κ

Letní tepelná zátěž interiéru stavby není konstantní, mění se každý den se střídáním dne a noci. Tepelné namáhání vnitřní tepelně akumulační hmoty je tedy periodické s periodou změny odpovídající jednomu dni (viz část B.5.5). Ve dne je tepelná zátěž nejvyšší, v noci nejnižší. Při rychle opakující se změně teploty nedokáže vnitřní hmota absorbovat do celé své hloubky tepelnou energii v podobě tepelné zátěže místnosti. Tento fakt je zřejmý zejména u masivních tlustých konstrukcí, kde je tepelně penetrována jenom část vnitřní strany přivrácené k interiéru z celkové tloušťky konstrukce. Tato tloušťka se nazývá penetrační hloubka δ a je definována v normě ČSN EN ISO 13786 [3].

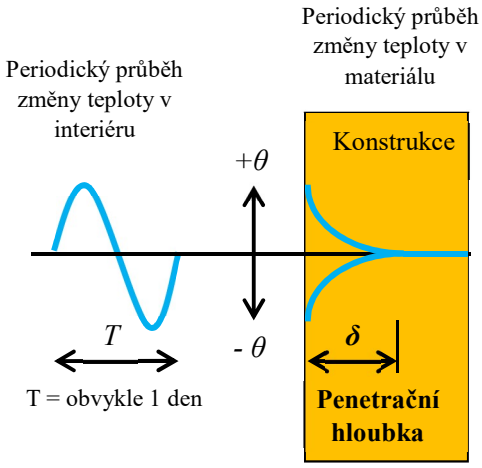
$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \varrho c}} \qquad [\mathrm{m}] \qquad (11)$$

kde je:

δ	periodická penetrační hloubka [m]
λ	součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
T	perioda opakování [s]
ρ	objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]
c	měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]

π Ludolfovo číslo – konstanta [-]

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. 35) [49] [50]. V případě výpočtů krátkodobé tepelné akumulace u obytných staveb, pod které letní tepelná stabilita spadá, je vhodné uvažovat periodu $T = 24$ hodin.



Obr. 35 Periodická penetrační hloubka δ - schéma

Pro určení efektivní vnitřní tepelně akumulační schopnosti konstrukce v letním období tedy nemůžeme počítat s celkovou tloušťkou vrstvy či materiálu. Pouze s částí materiálu přivrácené k interiéru, pakliže není tepelně akumulační vrstva velmi tenká. Tuto charakteristiku zastupuje veličina zvaná plošná tepelná kapacita κ [kJ/(m^2·K)], která je definována taktéž v normě ČSN EN ISO 13786 [3]. Zmíněná norma popisuje několik postupů, jak hodnotu κ vypočítat u jednotlivé vrstvy nebo přímo celé konstrukce.

F.3 Plošná tepelná kapacita κ – zjednodušená metoda (*metoda δ*)

Nejjednodušším postupem pro určení plošné tepelné kapacity je výpočet za použití součinu objemové hmotnosti ρ, měrné tepelné kapacity c a efektivní tloušťky, která vychází z penetrační hloubky δ (*metoda δ*). Norma ČSN EN ISO 13786 stanovuje:

- u vrstev, které jsou tenčí než polovina penetrační hloubky, může být započítána celá jejich plošná tepelná kapacita.

- v případě vrstev o tloušťce větší, než dvojnásobek penetrační hloubky může být do plošné tepelné kapacity uvažováno nejvýše cca 70 % z penetrační hloubky daného materiálu.

Určení periodické penetrační hloubky však není vždy zcela jednoznačné, stále podléhá odbornému odhadu. Zejména její použití při relativním srovnání materiálů nemusí být vždy vypovídající, taktéž se nehodí pro vícevrstvé konstrukce. Dále se zde nebere v potaz vliv přestupu tepla na povrchu konstrukce R_s [(m^2·K)/W]. Taktéž zde není možno započítat předřazený tepelný odpor izolačního materiálu na vnitřním povrchu konstrukce (např. koberec, dřevěná podlaha, SDK podhled). Jednoduchost metody je zde tedy vyvážena nižší přesností.

F.4 Plošná tepelná kapacita κ – metoda efektivní tloušťky

Tato velmi zjednodušená metoda není vhodná pro všechny stavební materiály a předpokládá velkou tloušťku materiálu. Je zde počítáno s efektivní tloušťkou d_T, která zastupuje penetrační hloubku δ a z které se již přímo počítá plošná tepelná kapacita. Efektivní tloušťka d_T je nejnižší hodnotou z níže uvedeného:

a) polovina celkové tloušťky vrstvy

b) celá tloušťka vrstvy materiálu až po první tepelně izolační vrstvu

c) efektivní tloušťka je dána periodou variací: 1 hodina = 20 mm, 1 den = 100 mm, 1 týden = 250 mm

Metoda je ze všech metod nejméně přesná, je spíše orientační a není vhodná pro účely této práce.

F.5 Plošná tepelná kapacita κ – zjedn. metoda s odporem při přestupu tepla (*metoda δ+R+Rs*)

Jedná se o přesnější metodu, která počítá i s vlivem odporu při přestupu tepla R_s. Taktéž počítá s vlivem nezanedbatelné izolační vrstvy materiálu na jejím povrchu reprezentovanou tepelným odporem R. Veličina je určena vzorcem:

$$\kappa = \sqrt{\frac{\kappa^2}{1+\omega^2\kappa^2(R+R_S)^2}} \quad [\text{kJ/(m}^2\text{·K)}] \qquad (12)$$

Kde je:

κ plošná tepelná kapacita [kJ/(m^2·K)]

R_S tepelný odpor při přestupu tepla [(m^2·K)/W]

R tepelný odpor předřazené vrstvy [(m^2·K)/W]

ω úhlová frekvence - $\omega = \frac{2\pi}{T}$ [rad/s]

F.6 Plošná tepelná kapacita κ – přesná metoda pro vícevrstvé konstrukce (*metoda matice Z*)

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). Metoda umožňuje počítat již se skladbou složenou z více vrstev materiálů a také umožňuje zahrnout do výpočtu vliv přestupu tepla R_s na povrchu konstrukce. Veličina je určena vzorcem:

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi}\left|\frac{Z_{11}-1}{Z_{12}}\right| \qquad [kJ/(m^2\cdot K)] \quad (13)$$

Kde je:

κ plošná tepelná kapacita [kJ/(m^2·K)]

T perioda opakování [s]

π Ludolfovo číslo – konstanta [-]

Z_{mn} jednotlivé elementy matice přenosu tepla

F.7 Odpor při přestupu tepla R_s

Pro přesnější metody výpočtu plošné tepelné kapacity je potřeba znát odpor při přestupu tepla. Přestup tepla zásadně ovlivňuje výslednou plošnou tepelnou kapacitu konstrukce. Přestup tepla se skládá z části přestupu konvekcí a sáláním. Dle normy [20] a dostupné literatury můžeme konstatovat, že odpory při přestupu tepla R_s se pohybují běžně v rozmezí 0,04 až 0,17 (m^2·K)/W dle umístění konstrukce a rychlosti proudění vzduchu okolo ní. V této práci byly při simulacích použity většinou normové odpory při přestupu tepla R_{si} na vnitřní straně – podlaha / stěna / strop = 0,17 / 0,13 / 0,10 (m^2·K)/W a na exteriérové straně R_{se} 0,04 (m^2·K)/W.

F.8 Plošná tepelná kapacita κ běžných stavebních materiálů

V úvodní části B.9.4 byly srovnány tradiční stavební materiály z hlediska objemové tepelné kapacity c_V. Toto srovnání však není přesné. Tabulka 5 uvádí plošné tepelné kapacity κ stejných materiálů, tentokrát ale s uplatněním principu penetrační hloubky a jednotlivých metod dle ČSN EN ISO 13786 [3]. Výsledky v tabulce tedy ukazují efektivní skutečnou tepelnou akumulaci konstrukce při periodickém stavu nabíjení a vybíjení s časem 1 den (krátkodobá tepelná akumulace). Cílem tabulky je nejenom porovnat jednotlivé stavební materiály, ale také porovnat jednotlivé metody výpočtu plošné tepelné kapacity konstrukce.

Tabulka 5 ukazuje samostatné vrstvy materiálů při různém odporu při přestupu tepla. Plošné tepelné kapacity materiálů těžkých konstrukcí jsou počítány s nekonečně velkou tloušťkou, v praxi se nosná část těžké stěny pohybuje v rozmezí cca 0,2 m až 0,4 m. Naopak plošná tepelná kapacita deskových materiálů lehkých konstrukcí je zobrazena jenom pro samotný materiál, bez uplatnění dalších interiérových vrstev v sendviči. Takže celková tepelná kapacita κ skladby těžké zděné konstrukce může být mírně nižší, naopak lehká konstrukce dřevostavby bude složena z vícero vrstev, tudíž bude vyšší. Tabulka 5 tedy srovnává spíše jednotlivé materiály, nikoli celé konstrukce.

Periodická penetrační hloubka δ se bez uplatnění odporu při přestupu tepla pohybuje u masivních materiálů jako VPC, CPP na úrovni cca 12 cm. Teplotní vlna zasáhne až do této tloušťky, ale skutečná tepelná akumulace (tepelná kapacita) se uplatňuje na nižší úrovni. Zjednodušená *metoda* δ (viz část F.3) doporučuje použít cca 70 % z penetrační hloubky. Ekvivalentní akumulační hloubka tedy klesne na cca 8 cm. U lehčených tvárnic je penetrační hloubka nižší.

Plošná tepelná kapacita se pohybuje pro ŽB od 277 kJ/(m^{2}K) až po superizolační pórobetonové tvárnice s 18 kJ/(m^{2}K). S uplatněním odporu při přestupu tepla R_{si} plošná tepelná kapacita κ razantně klesá (*metoda δ+R+Rs* - viz část F.5). Pro porovnání je použito R_{si} = 0,075. Železobeton klesne na 153 kJ/(m^{2}K), superizolační pórobetonové tvárnice zůstávají na 18 kJ/(m^{2}K). Přesná *metoda matice Z* dle části F.6 poskytuje ještě nižší výsledky, železobeton má 110 kJ/(m^{2}K) a pórobeton klesá na 17 kJ/(m^{2}K). S vyšším tepelným odporem při přestupu tepla, který bude pravděpodobně reálnější, plošná tepelná kapacita masivních materiálů opět klesá.

Specifické jsou materiály nebo vrstvy, které mají tloušťku podobnou jejich penetrační hloubce – např. CLT panel, betonová mazanina, ekopanel. Zde se dá zjednodušeně říci, že je využita většina jejich tepelně akumulačního potenciálu bez ohledu na metodu výpočtu nebo odpor při přestupu tepla.

U tenkých vrstev není plošná tepelná kapacita κ přesnou metodou uváděna vůbec. Výsledky se napříč metodami výpočtu a odporem při přestupu tepla prakticky vůbec nemění. Konstrukce jsou tak tenké, že se při periodě T rovno jednomu dni v plné míře tepelně nabijí.

Pro výpočet plošné tepelné kapacity konstrukce κ a místnosti je ale přesto vhodné používat přesnou *metodu matice Z* z části F.6. Taktéž je vhodné se zaměřit na odpor při přestupu tepla R_{si}. Zejména u masivních materiálů tyto faktory hrají důležitou roli v jejich skutečné tepelné akumulaci v porovnání s ostatními materiály.

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	Plošná tep. kapacita - metoda δ	Plošná tep. kapacita - metoda δ+R+Rs	Plošná tep. kapacita - metoda δ+R+Rs	Plošná tep. kapacita - metoda matice Z	Plošná tep. kapacita - metoda matice Z	Plošná tep. kapacita - metoda matice Z
	ρ	c	cv	λ	δ	-	d	κ					
	[kg/m³]	[J/(kg·K)]	[MJ/(m³·K)]	[W/(m·K)]	[mm]	-	[mm]	[kJ/(m²·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**
Vápenopiskové tvárnice	2000	1000	2,00	1,05	120	0,70	84	**168**	**124**	**80**	**170**	**95**	**64**
Vápenopiskové 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**
Sádrokartonová 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 5 Plošná tepelná kapacita κ běžných stavebních materiálů

F.9 Srovnání plošné tepelné kapacity κ běžných stavebních materiálů

Z hlediska srovnání materiálů nenastává od části B.9.4 příliš velká změna. V rámci stěn má nejvyšší plošnou tepelnou kapacitu κ opět železobeton 110 resp. 70 kJ/(m^2·K) při odporu při přestupu tepla R_{si} 0,075 resp. 0,15 (m^2·K)/W. VPC tvárnice mají 95, resp. 64 kJ/(m^2·K). Standardní keramické dutinové tvárnice jsou již o poznání níže – 29, resp. 26 kJ/(m^2·K). Na nejnižší pozici jsou superizolační pórobetonové tvárnice – 17, resp. 16 kJ/(m^2·K). Můžeme tedy stále pozorovat velký rozdíl mezi masivními a lehčenými tvárnicemi (např. VPC vs. keramické tvárnice). U zděných konstrukcí nesmíme ale zapomínat na vliv tepelné kapacity omítky.

CLT panel s 32, resp. 28 kJ/(m^2·K) dosahuje obdobných hodnot jako keramické zdivo. Překvapivě obdobných výsledků dosahuje slaměný lisovaný ekopanel. Standardní opláštění dřevostavby SDK a OSB deskou se s cca 25 kJ/(m^2·K) v součtu dostane na úroveň standardních pórobetonových tvárnic. Velký potenciál představuje pro ekologickou dřevostavbu hliněný panel s cca 40 kJ/(m^2·K).

V rámci podlah má nejvyšší plošnou tepelnou kapacitu opět betonová mazanina 103, resp. 72 kJ/(m^2·K). Anhydrit je na hodnotě 65, resp. 55 kJ/(m^2·K). Suché podlahy, např. v provedení sádrovláknitých desek mají hodnotu podstatně nižší - cca 24 kJ/(m^2·K).

V rámci stropů a střech je situace v podstatě podobná jako u stěn. Buďto jsou ze spodní strany stropy masivní s vysokou tepelnou kapacitou (např. železobeton, keramické vložky) nebo jsou to lehké konstrukce zevnitř opláštěné deskami s nízkou tepelnou kapacitou (např. SDK, OSB). Pakliže se ale masivní vrstva u těžkých konstrukcí oddělí od interiéru instalační mezerou bez izolace a sádrokartonem, tepelná kapacita opět klesne.

Pro příklad se může uvést ŽB strop 200 mm se zavěšeným SDK podledem a instalační mezerou bez izolace tloušťky 40 mm. Bez SDK podhledu je plošná tepelná kapacita κ železobetonu zhruba 91 kJ/(m^2·K) a s SDK podhledem pouhých 35 kJ/(m^2·K) (R_{si} 0,10). Betonová mazanina mokrého systému podlahy 60 mm má bez podlahové krytiny κ 66 kJ/(m^2·K) a s plovoucí dřevěnou podlahou 15 mm, na měkké podložce 5 mm κ 39 kJ/(m^2·K) (R_{si} 0,17).

F.10 Celková tepelná kapacita místnosti C_m a $C_{m,V}$

Při celkovém srovnání musí být brán taktéž v úvahu odpor při přestupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce R_{si}. U podlah je vyšší – standardně 0,17 (m^2·K)/W. U stěn je to 0,13 (m^2·K)/W a u stropů je nižší – cca 0,10 (m^2·K)/W. Průměrná obytná místnost má rozměry např. 4 x 4 x 2,6m. Její podlahová plocha je 16 m^2, strop má taktéž 16 m^2. Pokud budou mít okna a vnitřní dveře 7 m^2, bude plocha stěn cca 35 m^2. Vidíme tedy, že u standardně velkých pokojů tvoří podlaha cca ¼ celkové obalové plochy místnosti. Strop tvoří také cca ¼. Zbytek celkové plochy místnosti pak tvoří pocha stěny - cca ½. Vidíme, že stěny mají hlavní váhu při ovlivnění celkové tepelné akumulace místnosti. U menších místností se váha stěny zvyšuje, u větších místností se váha zmenšuje. Do tepelné kapacity místnosti je vhodné počítat pouze vnitřní čisté rozměry, protože právě tento povrch konstrukce se podílí na tepelné akumulaci. 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/(m^3·K)].

Pro dosažení co nejvyšší tepelné kapacity místnosti κ je proto vhodné se soustředit zejména na materiál stěn. Z tohoto pohledu pomůže dřevostavbám vnitřní opláštění masivnějším materiálem. Avšak takový konvenční systémový materiál zatím neexistuje. Dá se samozřejmě použít zdvojené nebo ztrojené opláštění sádrokartonem nebo sádrovláknitou deskou. V oblasti ekologických staveb se velmi hodí hliněné systémové panely opatřené hliněnou omítkou. Razantně zvyšují tepelnou akumulaci místnosti.

V suchých podlahách dřevostaveb může být řešením použití betonové mazaniny nebo litého betonu. Podlahy však mají menší plochu než stěna, dále mají horší odpor při přestupu tepla R_{si} než má stěna nebo strop. Taktéž jsou podlahy velmi často v obytných místnostech opatřeny teplými podlahovými krytinami, které tepelnou kapacitu zhoršují. Použití mokrého systému podlahy u dřevostaveb v podobě betonu nebo anhydritu je sice vhodné, ale není jisté, zda se využije celý jejich potenciál a dojde k razantnímu zvýšení tepelné akumulace místnosti.

Situace u stropů je obdobná jako u stěn. Možnost zvýšení tepelné akumulace dřevostavby je však problematická tím, že je technicky obtížné kotvit na strop těžší materiál. V úrovni stropu tedy není zcela velký potenciál na zvýšení tepelné akumulace místnosti.

G Hlavní simulace a měření

G.1 Simulace konstrukčních variant RD Dubňany v BSim

G.1.1 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 (viz část E.6.). Konstrukční varianty budou voleny od lehké dřevostavby až po velmi těžkou zděnou stavbu. Výsledky simulace budou sloužit pro vyhodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty na letní tepelnou stabilitu dané stavby v rámci jednoho samostatného dne.

G.1.2 Popis simulace

Tato simulace vychází ze základní simulace letní tepelné stability v části E.6.5. Simulace probíhá opět ve variantě stínění a ve variantě přehřívání. Vnitřní tepelné zisky jsou ponechány. Byly vytvořeny další konstrukční varianty, jedná se o lehké dřevostavby i o masivní těžké stavby s různou mírou vnitřní tepelně akumulační hmoty (Tabulka 6).

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 6 Zjednodušený popis konstrukčních variant RD Dubňany – simulace BSim

Tabulka prezentuje konstrukční varianty zjednodušeně v podobě vnitřních vrstev akumulujících teplo. Detailní popis skladeb je součástí další kapitoly. Simulace popisuje zejména nejvyšší teplotu $\theta_{o,max}$ dosaženou v místnostech v kritický den 28.7.

G.1.3 Konstrukční varianty

L1 – lehká dřevostavba:

Obvodová stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
Vrstva	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	DVD Flex+lať 40	60	0,047	2 127	69
3	OSB	15	0,130	1 700	600
4	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
5	DVD Flex+stoj.	150	0,041	2 104	48
6	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
7	DVD protect	60	0,051	2 100	250
8	omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita κ: 17 kJ/(m²·K), R=8,13, tl. 394 mm					

Vnitřní stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
Vrstva	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,130	1 700	600
3	DVD flex+sl60/160	160	0,050	2 139	79
4	OSB	12	0,130	1 700	600
5	SDK	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita κ: 28 kJ/(m²·K), R=3,73, tl. 260 mm					

Příčka (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
Vrstva	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,130	1 700	600
3	DVD flex+sl60/160	100	0,050	2 139	79
4	OSB	12	0,130	1 700	600
5	SDK	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita κ: 20 kJ/(m²·K), R=2,53, tl. 200 mm					

Podlaha 1.NP (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
Vrstva	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	OSB	22	0,130	1 700	600
2	DVD therm	65	0,042	2 100	155
3	OSB	22	0,130	1 700	600
4	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
5	DVD Flex+stoj.	270	0,043	2 095	55
6	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
7	Cetris deska	12	0,200	1 580	1 350
Tepelná kapacita κ: 24 kJ/(m²·K), R=10,10, tl. 486 mm					

Plochá střecha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,130	1 700	600
3	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
4	DVD Flex+stoj.	270	0,043	2 095	55
5	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
6	dřevo měkké	24	0,170	2 510	400
7	větraná mezera				
Tepelná kapacita *κ*: 27 kJ/(m²·K), R=8,41, tl. 409 mm					

Strop 1.NP / Podlaha 2.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	OSB	22	0,130	1 700	600
2	DVD therm	65	0,042	2 100	155
3	OSB	22	0,130	1 700	600
4	vzduch	215	1,000	1 010	1
5	DVD Flex+stoj.	100	0,043	2 095	55
6	vzduch	45	0,270	1 010	1
7	OSB	12	0,130	1 700	600
8	SDK	15	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita *κ*: 24 kJ/(m²·K), R=4,75, tl. 496 mm					

Šikmá střecha (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	DVD flex+CD rošt	27	0,080	1 995	73
3	DVD flex+CD rošt	53	0,044	2 100	45
4	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
5	DVD Flex+stoj.	270	0,043	2 095	55
6	DVD Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
7	větraná mezera				
Tepelná kapacita *κ*: 17 kJ/(m²·K), R=9,72, tl. 453 mm					

Strop 2.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1-7	– navíc oproti šikmé střeše na horní straně				
8	dřevo měkké	22	0,170	2 510	400
Tepelná kapacita *κ*: 17 kJ/(m²·K), R=9,84, tl. 475 mm					

L2 – dřevostavba:

V podlahách přibývá oproti variantě L1 betonová mazanina 50 mm, dále akumulační příčka CPN 12 m² v obytném prostoru 1.NP

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Viz var. 01 – mezi vrstvou 1 a 2:				
2	beton	50	1,360	1 020	2 300
Tepelná kapacita *κ*: 40 kJ/(m²·K), R=10,10, tl. 531 mm					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	CPN+omítky	160	1,100	1 000	1 800
Tepelná kapacita κ: 76 kJ/(m²·K), R=0,15, tl. 160 mm					

L3 – akumulační dřevostavba:

Trojité SDK opláštění stěn a dvojité SDK opláštění stropů. S betonovými mazaninami v podlahách, bez příčky CPN.

Obvodová stěna / Vn. stěna / Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	3xSDK	38	0,220	1 060	750
2	ostatní vrstvy jsou stejné				
Tepelná kapacita κ: 29 / 37 / 31 kJ/(m²·K)					

Pl. střecha 1.NP / Šik. střecha / Strop 2.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	2xSDK	25	0,220	1 060	750
2	ostatní vrstvy jsou stejné				
Tepelná kapacita κ: 33 / 25 / 25 kJ/(m²·K),					

L4 – akumulační dřevostavba:

Varianta L2, kde jsou stěny omítnuty hliněnou omítkou 50 mm.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. omítka	50	1,100	1 000	1 800
2	OSB	15	0,130	1 700	600
3	DVD Steico Flex+lať 40	60	0,047	2 127	69
4	DVD Steico Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
5	DVD Steico Flex+stoj.	150	0,041	2 104	48
6	DVD Steico Flex+pás. 60	45	0,049	2 139	79
7	DVD Steico protect	60	0,051	2 100	250
8	omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita κ: 69 kJ/(m²·K), R=8,12, tl. 431 mm					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. omítka	50	1,100	1 000	1 800
2	OSB	12	0,130	1 700	600
3	DVD Steico flex+sl60/160	160	0,050	2 139	79
4	OSB	12	0,130	1 700	600
5	hl. omítka	50	1,100	1 000	1 800
Tepelná kapacita κ: 69 kJ/(m²·K), R=3,48, tl. 284 mm					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	hl. omítka	50	1,100	1 000	1 800
2	OSB	12	0,130	1 700	600
3	DVD Steico flex+sl60/160	100	0,050	2 139	79
4	OSB	12	0,130	1 700	600
5	hl. omítka	50	1,100	1 000	1 800
Tepelná kapacita κ: 65 kJ/(m²·K), R=2,28, tl. 224 mm					

M1 – zděná – keramické tvárnice:

Keramický konstrukční systém, střechy jsou stejné jako u dřevostaveb.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	850	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	lepidlo	5	0,800	920	1 300
4	EPS 70F	223	0,039	1 270	15
5	omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita κ: 41 kJ/(m²·K), R=8,14, tl. 609 mm (stěna garáž R=3,38, 329 mm, EPS 124 mm)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	850	1 800
2	keram. tvárnice	360	0,150	960	750
3	VC omítka	15	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita κ: 41 kJ/(m²·K), R=2,43, tl. 390 mm					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	850	1 800
2	keram. tvárnice	115	0,150	960	750
3	VC omítka	15	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita κ: 32 kJ/(m²·K), R=0,80, tl. 145 mm					

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	OSB	22	0,130	1 700	600
2	beton	50	1,360	1 020	2 300
3	DVD therm	65	0,042	2 100	155
4	ŽB	60	1,580	1 020	2 400
5	MIAKO	190	0,600	960	650
6	EPS 70F	312	0,039	1 270	15
Tepelná kapacita κ: 40 kJ/(m²·K), R=10,11, tl. 699 mm					

M2 – zděná – keramické tvárnice:

V podlahách betonová mazanina 110 mm. Stropy a plochá střecha - keramický strop MIAKO s podvěšeným SDK podhledem.

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	OSB	22	0,130	1 700	600
2	beton	110	1,360	1 020	2 300
3	DVD therm	65	0,042	2 100	155
4	ŽB	60	1,580	1 020	2 400
5	MIAKO	190	0,600	960	650
6	EPS 70F	312	0,039	1 270	15
Tepelná kapacita *κ*: 41 kJ/(m²·K), R=10,15, tl. 759 mm					

Plochá střecha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	40	0,500	1 010	1
3	MIAKO	190	0,600	960	650
4	ŽB	60	1,580	1 020	2 400
5	EPS grafit 100	245	0,031	1 270	20
6	větraná mezera				
Tepelná kapacita *κ*: 36 kJ/(m²·K), R=8,40, tl. 548 mm					

H1 – zděná – VCP tvárnice:

Vápenopískový konstrukční systém. Plochá střecha a strop 1.NP železobetonová, střechy 2.NP stejné jako dřevostavby.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	VPC tvárnice	200	1,050	1 000	2 000
3	EPS 70F	310	0,039	1 270	15
4	omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita *κ*: 71 kJ/(m²·K), R=8,15, tl. 521 mm (stěna garáž R=3,38, 329 mm, EPS 124 mm)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	VPC tvárnice	200	1,050	1 000	2 000
3	VC omítka	5	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita *κ*: 77 kJ/(m²·K), R=0,2, tl. 210 mm					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	VPC tvárnice	115	1,050	1 000	2 000
3	VC omítka	5	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita *κ*: 49 kJ/(m²·K), R=0,12, tl. 125 mm					

Plochá střecha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	40	0,500	1 010	1
3	ŽB	200	1,580	1 020	2 400
4	EPS grafit 100	245	0,031	1 270	20
5	větraná mezera				
Tepelná kapacita κ: 51 kJ/(m²·K), R=8,39, tl. 505 mm					

H2 – zděná – VCP tvárnice:

Stěny VPC s nižší objemovou hmotností.

Obvodová stěna / Vn. stěna / Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
	VPC ve stěnách s nižší objemovou hmotností				
1	VPC tvárnice	-	0,400	1 000	1 400
Tepelná kapacita κ: 53 / 59 / 37 kJ/(m²·K),					

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	OSB	22	0,130	1 700	600
2	beton	110	1,360	1 020	2 300
3	MW	65	0,045	840	120
4	ŽB	200	1,580	1 020	2 400
5	EPS 70F	325	0,039	1 270	15
Tepelná kapacita κ: 40 kJ/(m²·K), R=10,11, tl. 662 mm					

H3 – zděná – VCP tvárnice:

Železobetonový strop 1.NP.

H4 – monolitická železobetonová:

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	ŽB	200	1,580	1 020	2 400
3	EPS 70F	313	0,039	1 270	15
4	omítka	6	0,750	850	1 500
Tepelná kapacita κ: 79 kJ/(m²·K), R=8,17, tl. 524 mm					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	ŽB	200	1,580	1 020	2 400
3	VC omítka	5	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita κ: 84 kJ/(m²·K), R=0,14, tl. 210 mm					

Příčka (i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	850	1 800
2	ŽB	115	1,580	1 020	2 400
3	VC omítka	5	0,990	850	1 800
Tepelná kapacita κ: 56 kJ/(m²·K), R=0,12, tl. 125 mm					

G.1.4 Tepelná kapacita místnosti

Aby mohly být jednotlivé konstrukční varianty porovnávány, musí být srovnány z hlediska celkové tepelné kapacity místnosti C_m (Tabulka 7). Tepelné kapacity byly počítány přesnou *metodou matice Z* pro vícevrstvé konstrukce dle normy ČSN EN ISO 13786 [3] (viz část F.6). Opory při přestupu tepla R_{si} byly použity stejné pro simulaci i výpočet tepelné kapacity κ: – stěna/podlaha/strop = 0,13/0,17/0,10 (m²·K)/W. Tepelné kapacity jsou prezentovány jako měrné, vztažené na m³ vnitřního vzduchu místnosti - $C_{m,V}$.

RD Dubňany_obytný prostor 1.NP	plocha [m²]	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/(m³·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

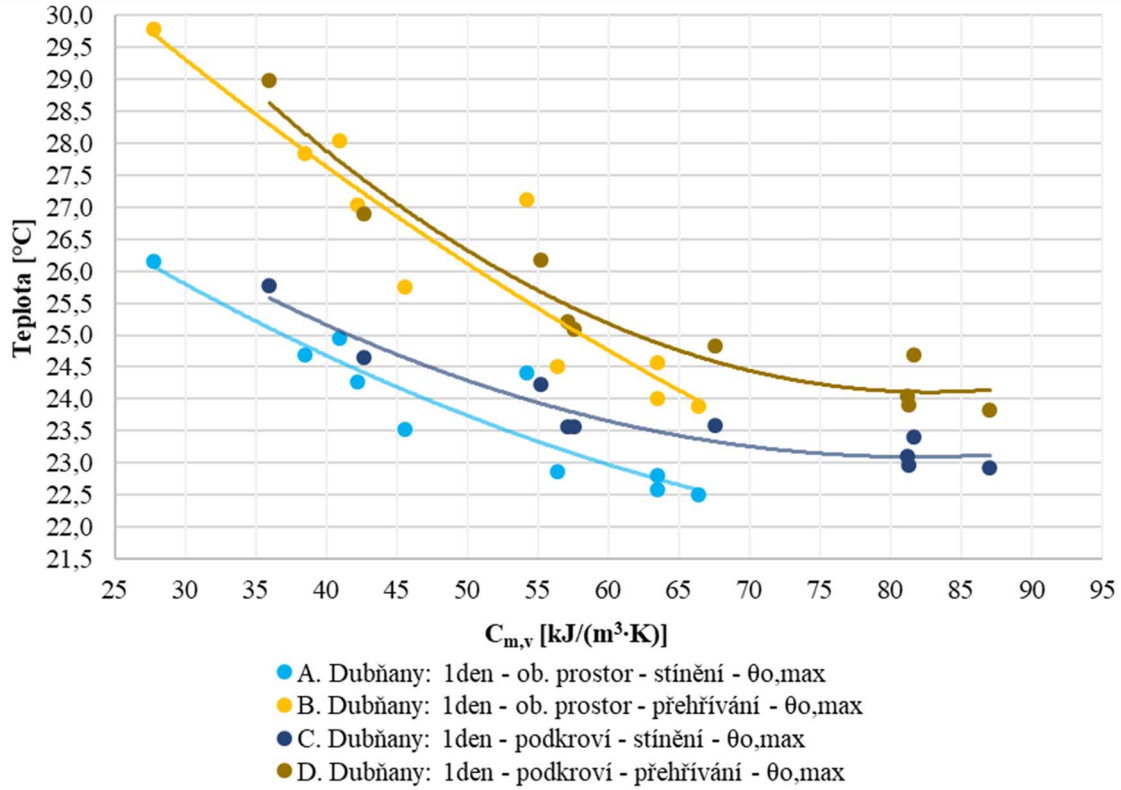
RD Dubňany_pokoj podkroví	plocha [m²]	L1	L2	L3	L4	M1	M2	H1	H2	H3	H4
obvodová stěna	13,7	17	17	29	69	41	41	71	53	71	79
vnitřní stěna	9,7	28	28	37	69	41	41	77	59	77	84
příčka	8,2	20	20	31	65	32	32	49	37	49	56
strop 1.NP	16,5	24	40	40	40	40	39	40	40	40	40
šikmá střecha	2,8	17	17	25	17	17	17	17	17	17	17
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/(m³·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 7 Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,V}$ konstrukčních variant a dosažené vnitří teploty pro obytný prostor 1.NP a podkrovní místnost 2.NP

G.1.5 Výsledky

U každé konstrukční varianty byla zjištěna nejvyšší teplota vnitřního vzduchu $\theta_{o,max}$ pro den 28.7. (výsledky viz Tabulka 7). Nejvyšší teploty bylo dosaženo u obou místností (obytný prostor 1.NP, podkroví) ve variantě s nejmenší tepelnou kapacitou $C_{m,V}$. Naopak nejnižší teploty $\theta_{o,max}$ bylo dosaženo u místnosti s nejvyšší tepelnou kapacitou. Rozdíly mezi nejvyšší a nejnižší teplotou jsou pro variantu stínění 3,7 °C pro obytný prostor a 2,8 °C pro podkrovní místnost. V případě přehřívání je rozdíl 5,9 °C pro obytný prostor a 5,2 °C pro podkrovní místnost.

Graf 27 zobrazuje celkové výsledky simulace. Nejvyšší dosažené teploty vzduchu $\theta_{o,max}$ jsou přiřazeny k celkové měrné tepelné kapacitě místnosti $C_{m,V}$. K jednotlivým výsledkům pro danou místnost je přiřazena spojnice trendu zastupující vliv tepelné kapacity místnosti na výslednou vnitřní teplotu. Výsledky nejsou zcela konzistentní a od spojnice se občas značně rozchází. Obecně lze ale říci, že spojnice trendu nabývá tvaru přímky (obývací pokoj) až mírné exponenciály (podkroví). Se snižující se tepelnou kapacitou $C_{m,V}$ vesměs lineárně roste nejvyšší dosažená teplota vzduchu $\theta_{o,max}$. V případě obytného prostoru ve variantě lehké dřevostavby L1 a zděné stavby z keramických tvárnic s lehkou střechou M1 je rozdíl v dosažené teplotě vzduchu $\theta_{o,max}$ cca 1,9 °C. Pakliže vezmeme v úvahu standardnější dřevostavbu L2 versus variantu M1, rozdíl činí pouze cca 0,4 °C. U podkrovní místnosti činí rozdíly L1 vs. M1 cca 2,2 °C a L2 vs. cca M1 1,1 °C. Pakliže použijeme v dřevostavbě akumulační prvky, budou dosahovány obdobné teploty jako u zděné stavby M1. Naopak pokud budeme srovnávat nejlehčí dřevostavbu L1 s těžšími zděnými stavbami (např. H1 – obytný prostor - těžký strop, podkroví - lehký strop), zvýší se rozdíly pro obytný prostor na cca 3,4 °C a pro podkroví na 2,8 °C. Rozdíly mezi variantou L2 vs. H1 jsou u obývacího pokoje cca 1,9 °C a pro podkroví cca 1,7 °C. U varianty přehřívání jsou rozdíly vyšší, zejména u obytného prostoru 1.NP.



Graf 27 Dosažené vnitřní teploty $\theta_{o,max}$ u konstrukčních variant místností RD Dubňany - simulace BSim

G.1.6 Závěr

Z dosažených teplot je patrné, že se velmi lehké stavby přehřívají více než těžké stavby. Pro interpretaci výsledků je důležité připomenout, že vyšetřované byly místnosti, které jsou poměrně exponované venkovnímu prostředí. Byl vyšetřován pouze jediný den, bez dalšího zjišťování dynamiky změn vnitřních teplot. Taktéž ve vyšetřovaný den byla místnost ve variantě přehřívání, ale i ve variantě stínění, vystavena nadměrným tepelným ziskům. Proto mohou být výsledky vlivu tepelné kapacity místnosti na výslednou vnitřní teplotu i pro samotnou stíněnou variantu mírně nadhodnocené (viz část E.6.9.).

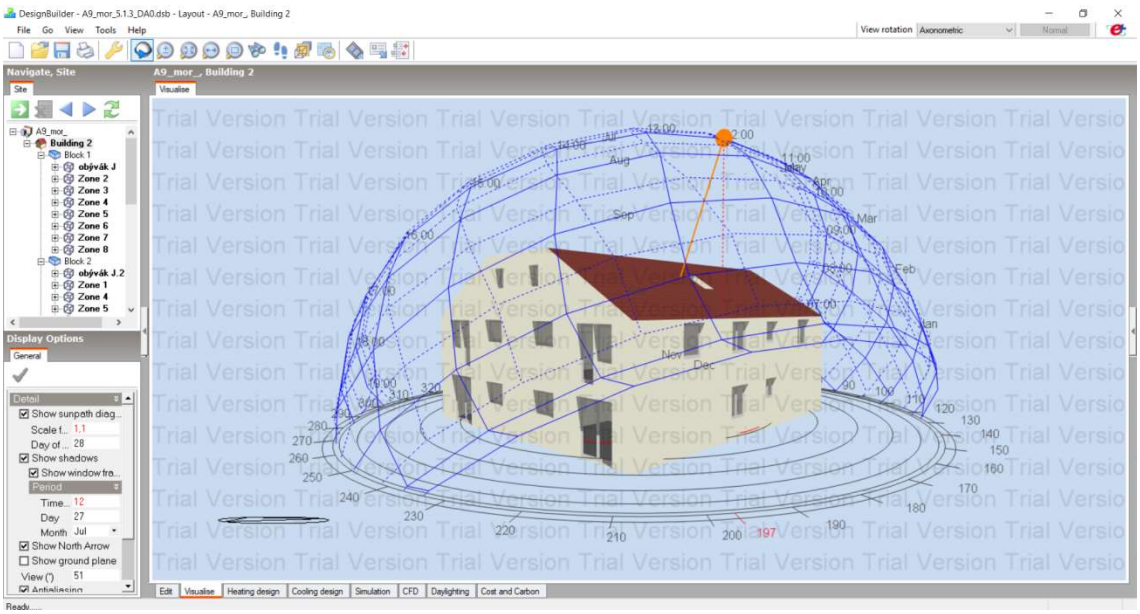
Velmi lehké dřevostavby bez akumulační hmoty se přehřívají oproti standardní zděné stavbě z keramických tvárnic v normální dny o cca 2,0 °C. Pakliže srovnáme velmi lehkou dřevostavbu a těžkou zděnou stavbu z vápenopískových tvárnic, rozdíly se zvýší na cca 3,0 °C. V případě srovnání dřevostavby s malou měrou tepelné akumulace (např. mokré systémy podlah), sníží se rozdíly 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. Tyto rozdíly bude těžké vůbec rozlišit a uživatelné je pravděpodobně nebudou vnímat negativně. Dále je vhodné stanovit referenční standardní zděnou stavbu - zděná stavba z keramických dutinových tvárnic. S těmito předpoklady se dá konstatovat, že standardní dřevostavby s malou měrou tepelné akumulace (např. L2 – mokrý systém podlah a OSB opláštění) se oproti standardním zděným stavbám (keramické zdivo) příliš nepřehřívají. Rozdíly teplot jsou zde do 1 °C. Avšak velmi lehké dřevostavby dosahují již vyšších rozdílových teplot, rozdíly jsou na úrovni 2 °C. Uživatelé budou tento nárust 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 tepelně akumulační hmoty.

G.2 Výpočetní program DesignBuilder

G.2.1 Popis výpočetního programu Design Builder

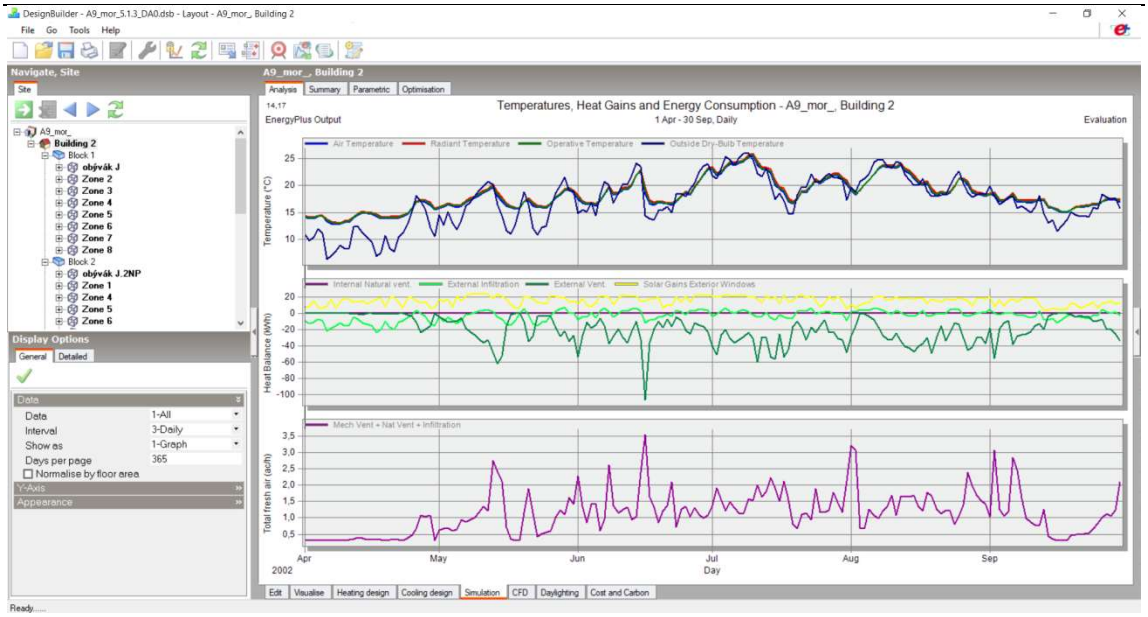
DesignBuilder je výpočetní nástroj, který běží na základě výpočetního jádra EnergyPlus. Program slouží pro komplexní dlouhodobou simulaci mikroklimatu budov, osvětlení, spotřeby energie a chování TZB systémů. Program je schopen popsat většinu fyzikálních dějů odehrávajících se uvnitř budovy. Lze simulovat i CFD děje vevnitř i vně budovy (výpočty proudění kapalin).



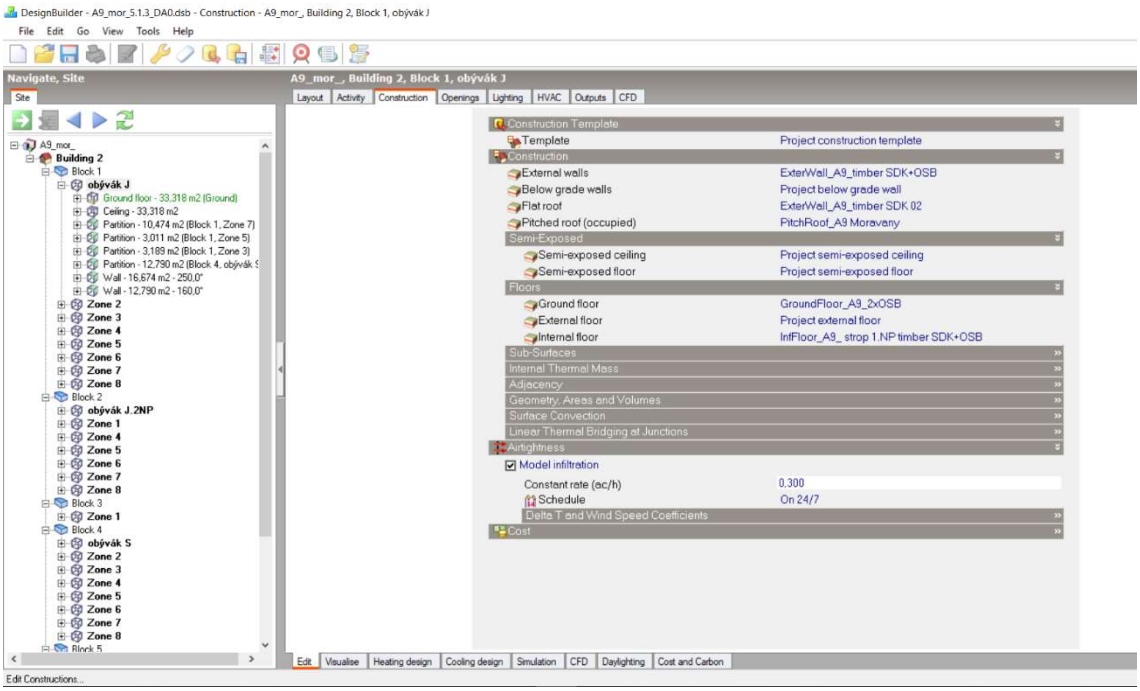
Obr. 36 Prostředí programu DesignBuilder

Program je rozdělen na tyto moduly: 3D modelář, Vizualizace, Certifikace, Simulace, Denní osvětlení, HVAC, Náklady, LEED, Optimalizace, Scripting – programování, CFD analýzy

Program DesignBuilder je podobný programu BSim. Ve 3D prostředí vytvoříme objekt, který je složen z větších celků - bloků. Bloky jsou tvořeny z místností. Standardně lze zadat klimadata, užívání objektu, TZB systémy, konstrukce a materiály. Jedná se o kvazi 3D model, proudění a rozvrstvení vnitřní teploty (CFD děje) jsou zjišťovány až v samostatném modulu CFD.



Obr. 37 Probíhající výpočet v programu DesignBuilder



Obr. 38 Přiřazení konstrukcí v programu DesignBuilder

G.3 Dlouhodobé měření letní tepelné stability dvojdomu RD Moravany a simulace v DesignBuilder

G.3.1 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.

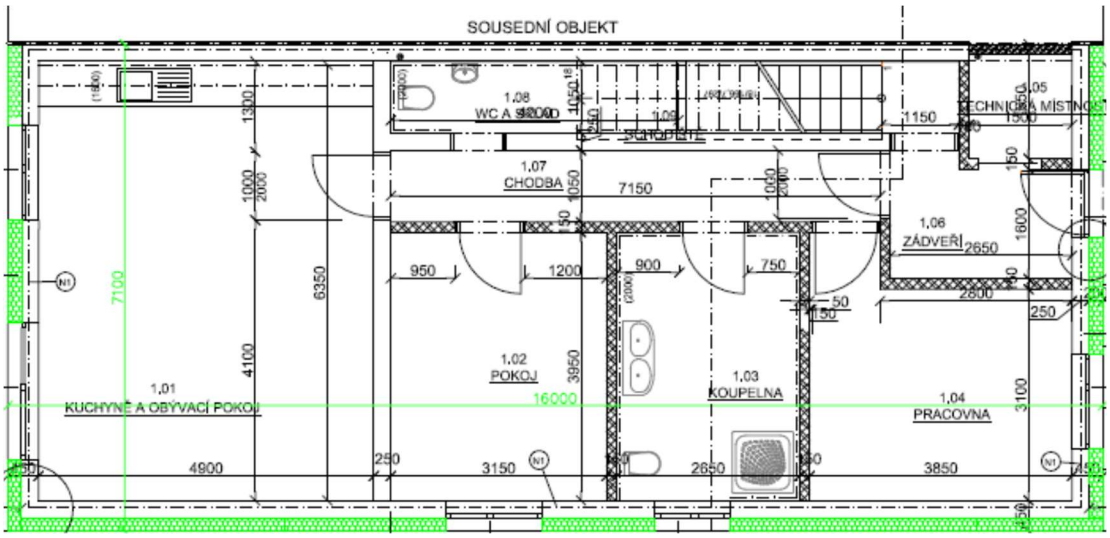
Dále bude provedena simulace obou částí domu za stejných klimatických podmínek jako při měření. Výsledky simulace budou sloužit pro porovnání s měřením, validaci a případné stanovení obecných závěrů s ohledem na letní tepelnou stabilitu.

G.3.2 Stavba RD Moravany

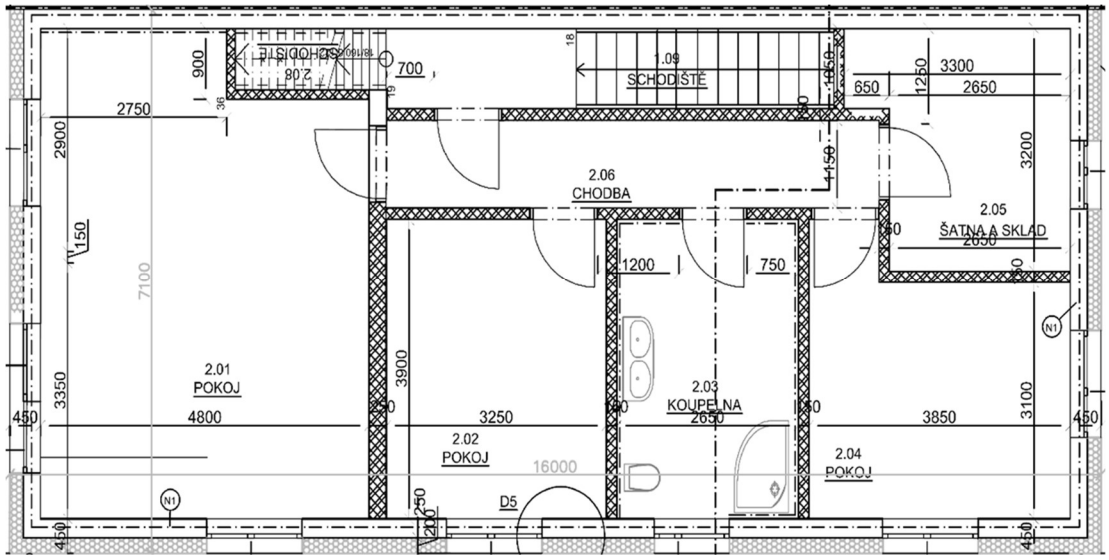
Vyšetřovaný objekt se nachází v blízkosti města Brna ve vesnici Moravany. Dvojdům má dvě nadzemní podlaží a obytné podkroví, stavba splňuje energeticky pasivní standard. Objekt je rozdělen na dvě symetricky totožné obytné jednotky – samostatné rodinné domy (Obr. 39). Jejich osa symetrie v podobě hřebenu 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 trámový. V podlahách se nachází litý anhydrit, šikmá střecha je tvořena klasickým krovem zaizolovaným minerální vatou tloušťky 400 mm.

Obr. 39 Rodinný dvojdům v Moravanech – pohled od JZ - jižní obytná jednotka vpravo a severní obytná jednotka vlevo

Obr. 40 Výstavba RD Moravany – pohled od JV



Obr. 41 Jižní obytná jednotka – půdorys 1.NP - 1.01 obývací pokoj s kuchyní na levé straně, 1.04 pracovna na pravé straně



Obr. 42 Jižní obytná jednotka – půdorys 2.NP

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.

G.3.3 Popis měření

Specifikace měření:

objekt:	pasivní dvojdům RD Moravany
účel měření:	letní tepelná stabilita
datum:	27.7. - 30.9. 2014

Měřené hodnoty:	(pro obě obytné jednotky)
venkovní prostředí	venkovní teplota vzduchu θ_e
obývací pokoj 1.NP 1.01	teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} *(1.01-J)*, θ_{ai} *(1.01-S)*
	vnitřní povrchová teplota stěny θ_p *(*W_{int} *- 1.01-J)*, θ_p *(*W_{int} *- 1.01-S)*
pracovna 1.NP 1.04	teplota vnitřního vzduchu θ_{ai} *(1.04-J)*, θ_{ai} *(1.04-S)*
měřicí přístroje:	vedení typu termočlánkové vedení typu J s čidly pro měření teploty vzduchu a povrchové teploty, dataloger COMET MS55D - zápis po 5min
další specifikace:	27.7 - 12.8. – přesné měření – je součástí práce
	12.8 - 28.8. – přesné měření – je součástí práce
	28.8. – 30.9. - měření s pobytem osob

Dlouhodobé sledování objektu a měření letní tepelné stability proběhlo v období od 27. 7. 2014 do 30. 9. 2014. Měřený objekt se nacházel ve stavu dokončovacích prací finálních povrchů v interiéru, proto proběhlo měření bez užívání objektu osobami. Teploty interiéru stavby byly měřeny zejména v obývacím pokoji 1.01 a také v pracovně 1.04 v 1.NP (Obr. 43 a Obr. 46). Jelikož je objekt rozdělen na dvě symetricky totožné obytné jednotky (dále již také OJ) – rodinné domy, byla výhodou možnost měřit současně obě zmiňované místnosti u obou obytných jednotek, jižní J a severní S. Okna obývacích pokojů obou obytných jednotek jsou shodně orientována na západ (přesněji mírně k jihozápadu). Okna pracoven jsou orientována zase na východ (respektive mírně k severovýchodu). Proto mají obě symetricky totožné místnosti stejnou výši solárních zisků přes průsvitné výplně otvorů. Venkovní teplota vzduchu θ_e byla měřena na parapetě kuchyňského okna jižní OJ 1.01 (Obr. 44). Dále byly měřeny vnitřní teploty vzduchu u všech 4 místností 1.NP (Obr. 47). Termočlánky byly přilepeny zhruba uprostřed místnosti na strop a spuštěny o cca 50 cm níže. Taktéž byly měřeny vnitřní povrchové teploty

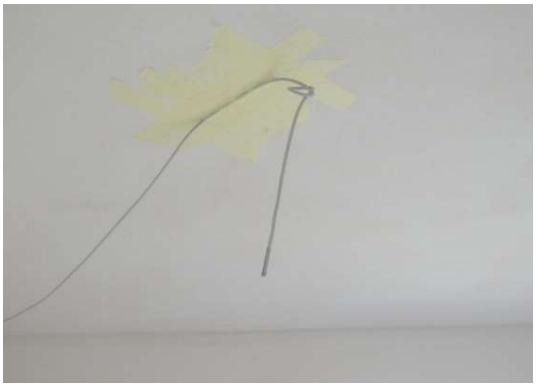
obvodové stěny u obou obývacích pokojů (Obr. 45) – zhruba uprostřed stěny bez oken v půlce její výšky.

Obr. 43 Obývací pokoj 1.01 v 1.NP – jižní obytná jednotka

Obr. 44 Měření venkovní teploty vzduchu – čidlo stíněné krabicí

Obr. 45 Měření vnitřní povrchové teploty obvodové stěny – čidlo lepeno páskami

Obr. 46 Pracovna 1.04 v 1.NP - jižní obytná jednotka



Obr. 47 Měření vnitřní teploty vzduchu – čidlo spuštěno pod stropem

Obr. 48 Měřicí ústředna

Měření bylo přes teplotní čidla zaznamenáváno do měřicí ústředny. Globální sluneční záření J_M bylo odvozeno z fotovoltaické elektrárny umístěné na jižní straně střechy (sklon 30°). Průběh záření byl odvozen z FV elektrárny, nejvyšší dosažené hodnoty byly nastaveny na úroveň naměřených hodnot přilehlých měřicích klimatických stanic (Letiště Tuřany a VUT v Brně FAST). Zjištěné globální sluneční záření je tak na dostatečně přesné úrovni pro další práci. Okrajové podmínky při měření byly přesně známy zejména od začátku měření do 18. 8. 2014. V tomto vyšetřovaném období byly obě obytné jednotky vystaveny vyššímu tepelnému zatížení vlivem klimatických podmínek. Přestože v domě probíhaly ještě dokončovací práce (bez mokrých procesů), větrání domu a infiltrace byla minimální, blížící se nule. Vnitřní tepelná zátěž byla taktéž zanedbatelná. Vstupní dveře a okna byly stále uzavřeny. Objekt a jednotlivé místnosti nebyly nijak stíněny, nebyly použity vnější nebo vnitřní stínicí prvky. Plocha průsvitných výplní otvorů jednotlivých obytných místností je nižší. Z tohoto důvodu, i kvůli orientaci měřených místností na východ a západ se nepředpokládaly extrémní sluneční zisky. Přesto se však dá říci, že tento stav odpovídal přehřívání stavby, protože sluneční zisky nebyly nijak omezeny a stavba nebyla v noci větrána. V domě nebyly ještě instalovány vnitřní dveře, penetrace měřených místností byla zamezena zaslepením otvorů fólií. V práci je prezentována pouze první část měření od 27.7.2014 do 28.8.2014. V této době totiž byly přesně známy okrajové podmínky měření. V období po 28.8.2014 nebyla z důvodů zvýšené stavební činnost v objektu přesně známa zejména míra větrání a míchání vzduchu mezi jednotlivými místnostmi.

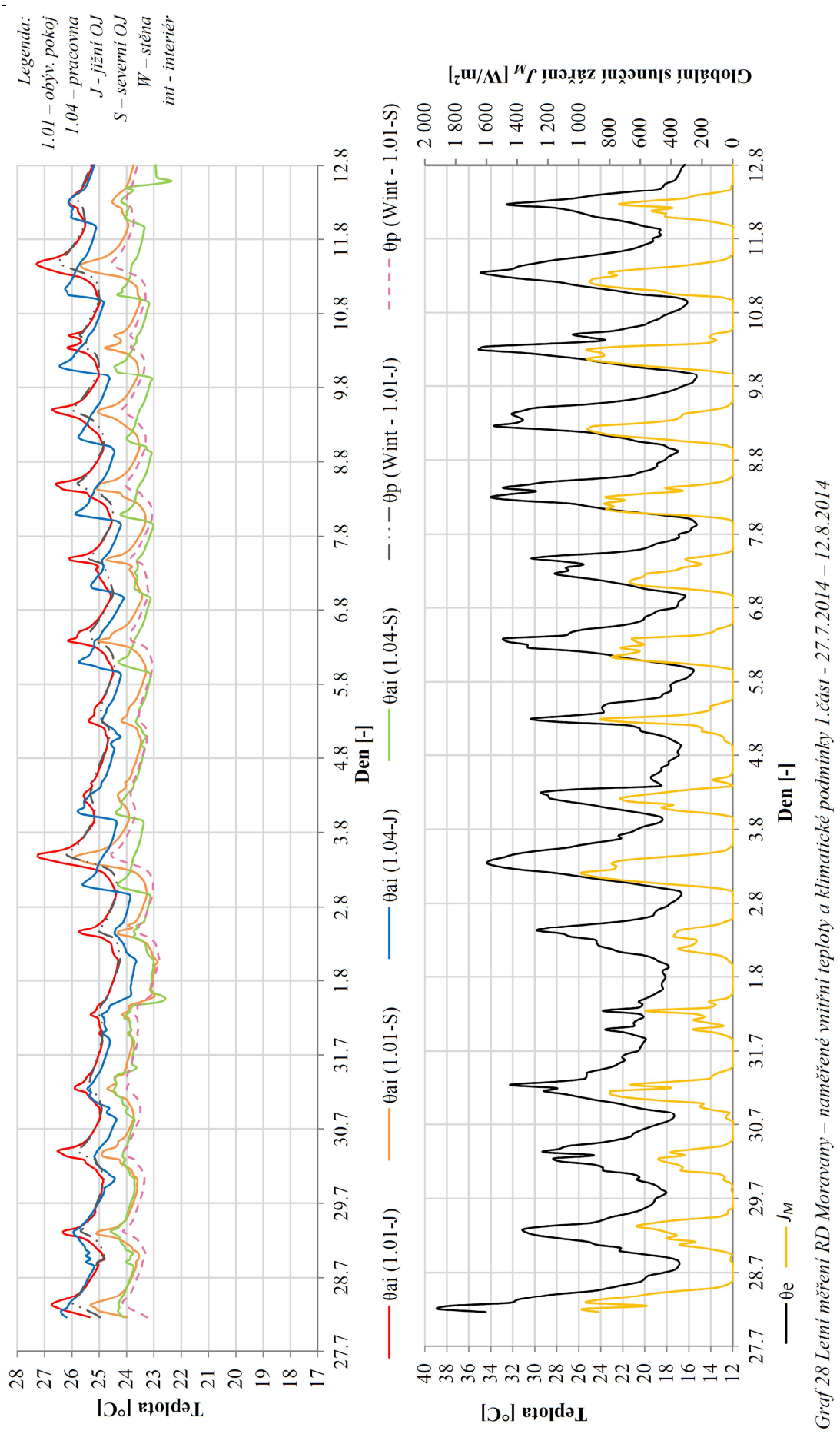
G.3.4 Výsledky měření

Hlavními měřenými místnostmi byly oba obývací pokoje s kuchyní 1.01 s okny pouze na západ (severní a jižní OJ). V první prezentované části měření, tj. období od 27. do 12. srpna se pohybovala venkovní teplota vzduchu θ_e v maximech okolo 30 - 34 °C. U obývacího pokoje se měřená vnitřní teplota vzduchu pohybovala u jižní OJ s denními výkyvy θ_{ai} *(1.01-J)* okolo 25,5 °C, u severní OJ θ_{ai} *(1.01-S)* okolo 24 °C (Graf 28). Rozdíl mezi teplotami těchto místností obou OJ se pohybuje zhruba mezi 1,3 - 1,5 °C. Vnitřní teplota vzduchu u pracoven 1.04 se pohybovala θ_{ai} *(1.04-J)* okolo 25 °C pro pracovnu v jižní OJ a θ_{ai} *(1.04-S)* okolo 23,5 °C pro pracovnu v severní OJ. Rozdíl mezi teplotami těchto místností obou OJ je zhruba roven 1,0 – 1,5 °C. Vnitřní teplota vzduchu je u obou

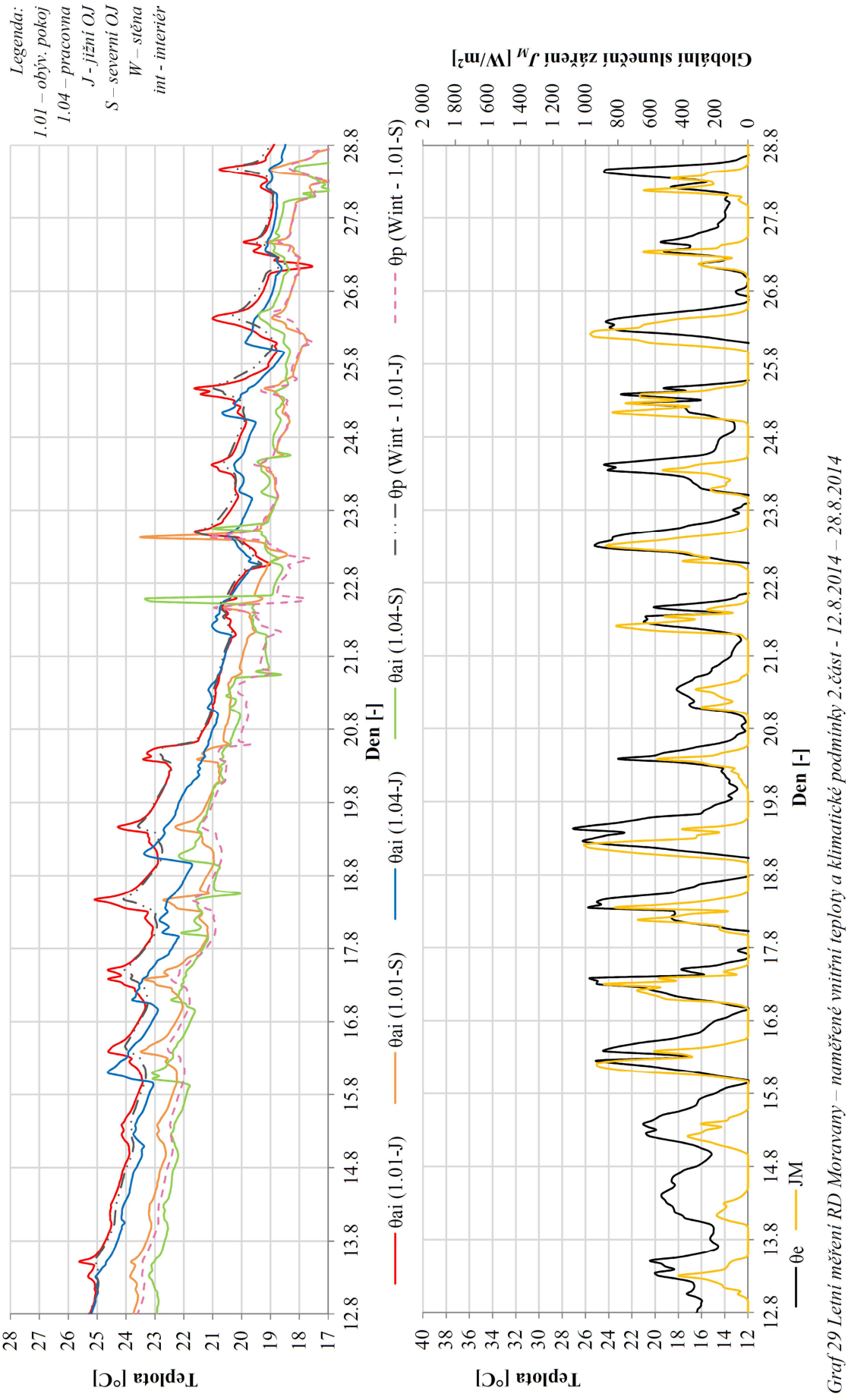
pracoven 1.04 vždy o zhruba 0,5 °C nižší (v denních špičkách trochu více) než u obývacích pokojů.

V druhé části měření, v období od 12. do 28. srpna bylo více oblačno, slunce svítilo méně (Graf 29). Sluneční zisky místností byly tudíž nižší. Venkovní teplota se pohybovala v denních maximech mezi 20 a 25 °C a v nočních minimech okolo 10 °C, což je na poměry České republiky poměrně nízká hodnota. Vnitřní teplota vzduchu místností θ_{ai} postupně klesla u obou místností jižní OJ na zhruba 19 °C a u obou místností severní OJ na zhruba 17 °C. Po dobu 16 dní docházelo průměrně k dennímu poklesu vnitřních teplot o necelé 0,4°C. Rozdíl ve vnitřní teplotě vzduchu mezi stejnými místnostmi zůstal zhruba stejný, popřípadě se o trochu snížil. V obejktu byla zvýšená stavební činnost a docházelo k mírnému větrání.

Vnitřní povrchové teploty obvodové stěny θ_p v obývacích pokojích 1.01 jsou velmi podobné vnitřní teplotě vzduchu místnosti θ_{ai}. Maximální rozdíly, zhruba 1 °C, nastávají zejména při přehřívání v první části meření v odpoledních hodinách při nejvyšší teplotě vzduchu v interiéru. V druhé části měření s nižšími slunečními zisky jsou již rozdíly nižší. Naopak v noci je u jižní OJ vnitřní povrchová teplota stěny identická s vnitřní teplotou vzduchu, u severní OJ je vnitřní povrchová teplota o trochu nižší.



Graf 28 Letní měření RD Moravany – naměřené vnitřní teploty a klimatické podmínky 1.část - 27.7.2014 – 12.8.2014



Graf 29 Letní měření RD Moravany – naměřené vnitřní teploty a klimatické podmínky 2.část - 12.8.2014 – 28.8.2014

G.3.5 Závěr z měření

Je nutné připomenout, že objekt nebyl téměř vůbec větrán, proto zde nebyla možnost nočního chlazení vnitřních konstrukcí pro nadcházející den. Dále okna nebyla stíněna. Na druhou stranu plocha průsvitných výplní otvorů jednotlivých obytných místností je nižší. Objekt také neměl vnitřní tepelné zisky. I tak se ale dá předpokládat, že tepelná zátěž a následné přehřívání místností bylo při měření větší, než by tomu bylo při skutečném provozním stavu a s uvážením stínění. Konstrukční systém domu je poměrně těžký, zděný.

Základní norma ČSN 730540-2 [5] požaduje nejvyšší teplotu vzduchu v místnosti pro referenční den $\theta_{ai,max} \leq 27$ °C. Rozdíl mezi referenčním dnem pro hodnocení podle této normy (28. Srpna, jasný slunný den, nejvyšší venkovní teplota vzduchu 30 °C) a skutečnými dny je poměrně malý. Podle hodnocení normy EN 15251 [25] a s uvážením průměrné denní teploty $\theta_{rm} \sim 25.5$ °C pro předešlé dny je požadovaná nejvyšší operativní teplota $\theta_{lmax} \sim 30.2$ °C (viz část B.5.7). Operativní teplota θ_o a vnitřní teplota vzduchu θ_{ai} jsou u pasivních domů velmi blízké. Lze konstatovat, že s ohledem na výše uvedené normy a jejich požadavky je dům tepelně stabilní. Teploty se prakticky téměř vůbec nepohybovaly nad výše požadovanými limity a byly by pravděpodobně ještě nižší, pokud by se okna stínila a docházelo by k nočnímu větrání.

Obecně lze na chování místností opět pozorovat zásadní vliv slunečních zisků přes průsvitné části obálky na výsledné vnitřní teploty.

Z hlediska relativního srovnání identických místností resp. obytných jednotek je v naměřených hodnotách shledán významný rozdíl. Autor se domnívá, že nelze jednoznačně určit příčinu. Avšak je vhodné vycházet z předpokladu, že u pasivního domu ovlivňuje vnitřní teplotu vzduchu prostup tepla neprůsvitnými částmi obálky budovy zcela minimálně [51]. Mnohem podstatnější vliv na přehřívání mají sluneční zisky přes průsvitné části obálky budovy. Proto by mělo být tepelné zatížení obou identických místností velmi podobné, tudíž i stejná výsledná vnitřní teplota vzduchu θ_{ai}. Nezanedbatelný rozdíl v dosažených teplotách ~ 1,0 - 1,5 °C lze vysvětlit mícháním vzduchu mezi místnostmi v rámci jedné obytné jednotky. Okna dalšího pokoje 1.02 a koupelny 1.03 byly u jižní OJ orientovány k jihu, naopak u severní OJ k severu. U jižní OJ se tedy tyto zbylé neměřené místnosti přehřívaly více než u severní. Fólie, kterými byly zaslepeny otvory dveří u měřených místností, totiž nebyly ideálně těsné. Navíc se

v objektu přes tyto otvory někdy pohybovali dělníci. Byla zde tedy možnost míchání vzduchu mezi místnostmi vlivem rozdílných teplot. Teplo se přes tenkou fólii také mohlo velmi efektivně předávat vedením. Schodiště mezi jednotlivými podlažími nebylo nijak zaslepováno, mohlo zde také potencionálně docházet k míchání vzduchu mezi podlažími.

Toto tvrzení podporuje i porovnání teplot obou místností téže obytné jednotky. Obývací pokoje 1.01 měly mnohem vyšší tepelnou zátěž slunečními zisky než pracovny 1.04., přesto jsou jejich teploty vzduchu mimo denní špičky v porovnání s pracovnami velmi obdobné. Vnitřní teploty obývacího pokoje nejsou o několik stupňů Celsia vyšší, teploty se tedy uvnitř obytné jednotky vyrovnávají. Z experimentálních dat lze tedy konstatovat, že pokud u přehřívané stavby nejsou místnosti mezi sebou neprodyšně uzavřeny, může mezi nimi probíhat poměrně silné míchání vzduchu. A bude tak i docházet k vyrovnávání teplot vzduchu mezi těmito místnostmi.

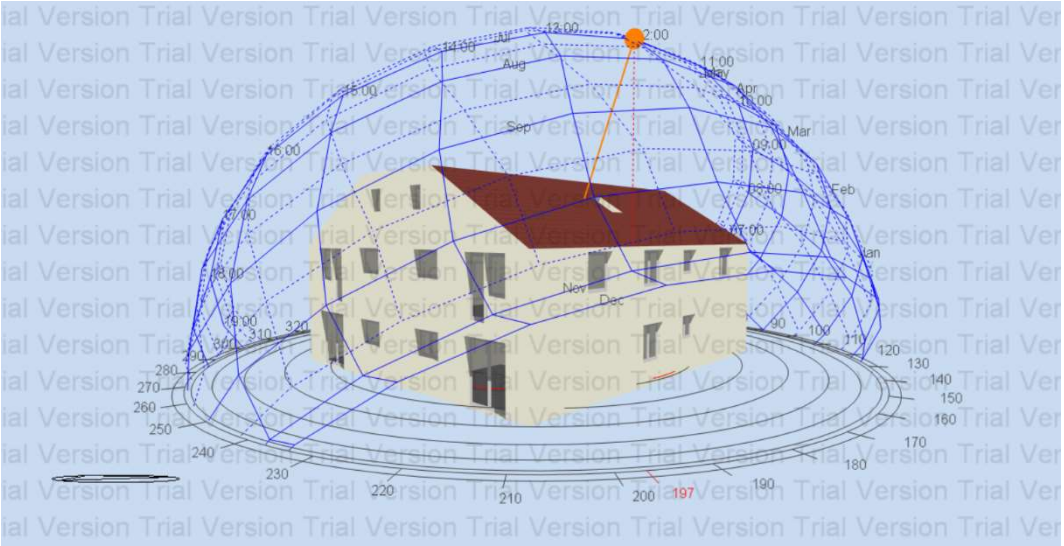
Obdobnou interpretací by mohlo být jednoduché porovnání vlivu slunečních zisků a akumulační hmoty u obou místností téže obytné jednotky. Podíl čisté plochy zasklení oken obývacího pokoje 1.01 vůči pracovně 1.04 je 3,8 m^2 vs. 1,1 m^2, tj. 3,5 x více. Podíl vnitřní plochy obalových konstrukcí těchto místností je cca 120 m^2 vs. 60 m^2, tj. 2x větší plocha. Pracovna 1.04 má tedy na 1 m^2 osluněného zasklení o 1,75x více dostupné akumulační hmoty. Přesto jsou teploty pro 1. měřené období u obývacího pokoje 1.01 většinou jenom o necelého 0,5 °C vyšší a ve špičkách většinou vyšší o 0,5 – 1 °C. Tato interpretace by však platila pouze v případě absence míchání vzduchu mezi místnostmi.

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 akumulační 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.

Tepelná zátěž slunečními zisky přes průsvitné části obálky místnosti byla o mnoho vyšší než tepelné ztráty přes neprůsvitnou obálku místnosti. Vychládání objektu bylo pozvolné, vliv akumulace stavby by v tomto porovnání neměl hrát velkou roli.

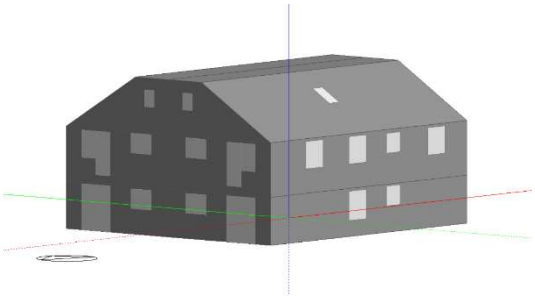
G.3.6 Popis srovnávací simulace

Na základě experimentálního měření objektu v Moravanech proběhla srovnávací simulace v rámci validace výpočetního softwaru. Simulace byla provedena výpočetním programem Design Builder 4.2. s výpočetním jádrem Energy Plus. Do klimatických dat byla vložena naměřená venkovní teplota vzduchu θ_e a globální sluneční záření J_M.

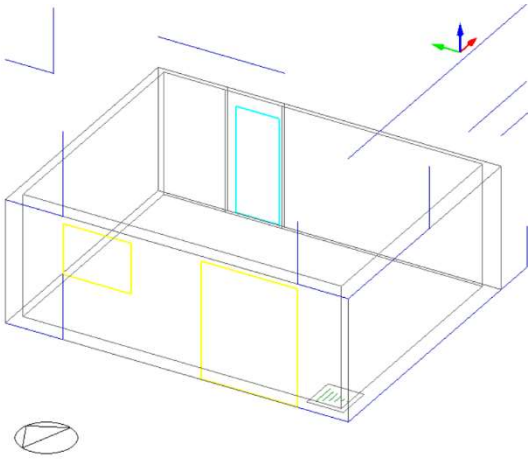


Obr. 49 Simulace DesignBuilder – objekt RD Dubňany

Ostatní klimatické ukazatele nemají na vnitřní teplotu vzduchu významný vliv. Užívání objektu a jeho provoz byl volen stejně jako při experimentálním měření. Větrání objektu bylo voleno kontinuálně na úrovni výměny vzduchu n 0,3 – 0,5 h^{-1}. Nebyly uvažovány vnitřní tepelné zisky.



Obr. 50 Simulace DesignBuilder – model RD Dubňany



Obr. 51Simulace DesignBuilder – RD Dubňany – obývací pokoj 1.01 jižní OJ

Níže jsou uvedeny jednotlivé konstrukční skladby objektu.

Skutečný konstrukční systém objektu:

Obvodová stěna (skladba i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	20	0,990	790	2 000
2	Keram. Zdivo	240	0,262	960	730
3	EPS 70F	200	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550

Podlaha 1.NP (skladba i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Ker. Dlaždice	10	1,200	850	2 000
2	Anhydrid	50	1,350	850	2 050
3	EPS 100S	220	0,038	1 270	20
4	asf. Pás	4	0,430	1 000	1 600
5	beton	150	1,360	1 020	2 300
6	zemina				

Strop 1.NP (skladba 2.NP-1.NP)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	Ker. Dlaždice	10	1,200	850	2 000
2	Anhydrid	50	1,350	850	2 050
3	EPS 100S	10	0,038	1 270	20
4	beton	50	1,360	1 020	2 300
5	MIAKO+POT	230	0,420	1 000	1 060
6	VC omítka	15	0,990	790	2 000

Vnitřní stěna (skladba i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	20	0,990	790	2 000
2	Keram. Zdivo	240	0,262	960	730
3	VC omítka	20	0,990	790	2 000

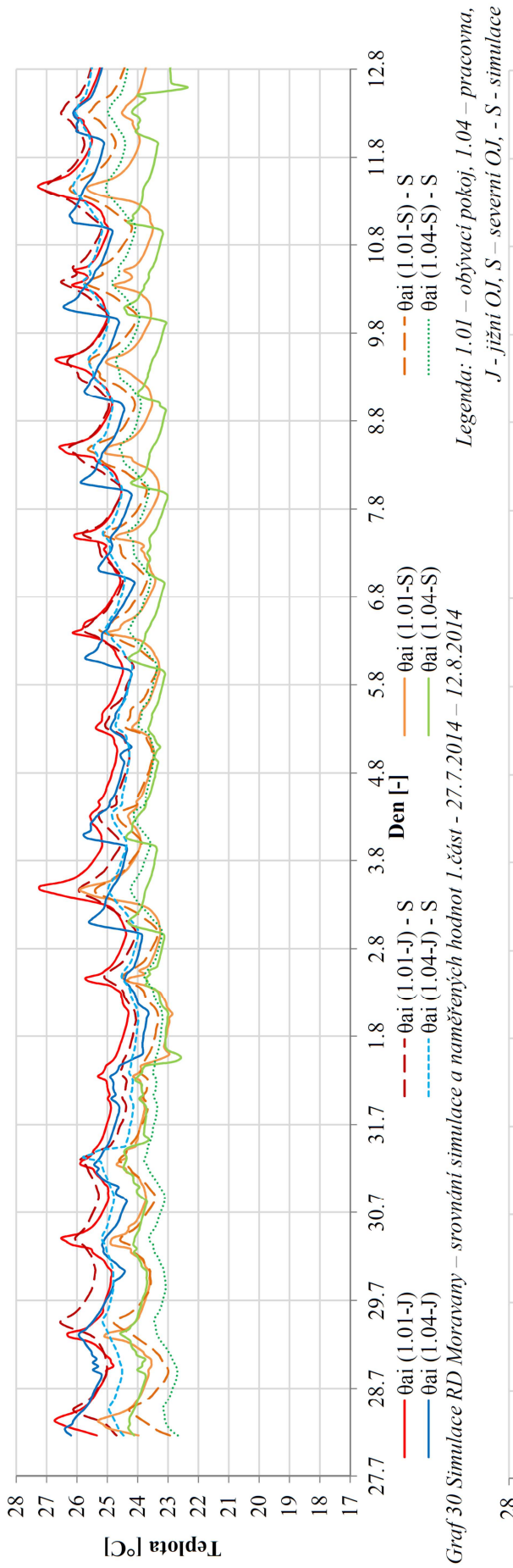
Příčka (skladba i-e)		d	λ	c	ρ
Vrstva	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	20	0,990	790	2 000
2	Keram. Zdivo	140	0,262	960	730
3	VC omítka	20	0,990	790	2 000

G.3.7 Výsledky srovnávací simulace

Výsledné hodnoty vnitřních teplot vzduchu u provedené simulace v porovnání se skutečně naměřenými hodnotami dosahují uspokojivých hodnot. V první části 27. července do 12. srpna teploty z výsledné simulace zhruba odpovídají naměřeným teplotám (Graf 30). Zejména pak výsledné teploty θ_{ai} u obou obývacích pokojů 1.01 dosahují až na výjimky rozdílu do 0,5 °C. Dynamika změn teplot obou místností je taktéž obdobná, ne však zcela totožná. Výsledky simulace se od měření v případě obou pracoven

1.04 odlišují již více. Rozdíly teplot občas přesahují i 1,0 °C, dynamika změn teplot není zcela identická. Nejvyšších teplot je dosahováno v jiném čase než u naměřených hodnot.

V druhé části od 12. srpna do 28. srpna se od sebe výsledky simulace a měření začínají značně rozcházet (Graf 31). V této době totiž byla některá okna 2. podlaží průběžně otevřena. Docházelo tím k infiltraci venkovního vzduchu a míchání vzduchu mezi jednotlivými podlažími a místnostmi. První podlaží proto postupně snižovala svoji teplotu až na úroveň oscilující zhruba okolo 19 °C. To zapříčinilo zejména noční větrání, kdy byla venkovní teplota vzduchu velmi nízká. V simulaci nebylo otevření oken modelováno, simulační nástroj Energy Plus neumožňuje simulaci proudění vzduchu (CFD). Navíc modelování proudění vzduchu mezi systémem místností je z hlediska kvality a přesnosti výstupů velmi náročná úloha. Výsledky simulace proto popisují vývoj vnitřních teplot vzduchu bez vlivu větrání otevřenými okny. Ve výsledcích simulace místností v prvním podlaží postupně snižovaly svoji teplotu až na hodnotu oscilující zhruba okolo 22,5 °C. Z tohoto pohledu jsou výsledky poměrně zajímavé. Nejvyšší venkovní denní teploty vzduchu θ_e dosahovaly v tomto období 20 °C, maximálně 25°C. Nejnižší noční teploty vzduchu θ_e dosahovaly 15 °C až 10 °C. Celkový úhrn slunečního záření byl oproti předešlému období nižší. Přesto teplota vzduchu u místností v simulaci již dále neklesla pod uvedených cca 22,5 °C.



Graf 30 Simulace RD Moravany – srovnání simulace a naměřených hodnot 1.část - 27.7.2014 – 12.8.2014

Legenda: 1.01 – obývací pokoj, 1.04 – pracovna, J - jižní OJ, S – severní OJ, - S - simulace

Graf 31 Simulace RD Moravany – srovnání simulace a naměřených hodnot 2.část - 12.8.2014 – 28.8.2014

Rozdíly v dosažených teplotách mezi jednotlivými místnostmi v simulaci zůstávají rámcově, s mírnými či většími odchylkami, obdobné. Mezi místnostmi jižní a severní OJ je stále znatelný rozdíl v dosažených teplotách θ_{ai}. Tento rozdíl však byl vynucen v simulaci nuceným mícháním vzduchu mezi místnostmi.

G.3.8 Závěr srovnávací simulace

Simulace stavby se shoduje s měřením pouze částečně. Rozdíl v dosažených výsledcích lze částečně vysvětlit vlivem míchání vzduchu mezi jednotlivými místnostmi. Taktéž rozdílné dosažené teploty v simulaci mezi stejnými místnostmi obou OJ nelze vyhodnotit tak, že by validovaly měření. Tento rozdíl byl v simulaci vynucen mícháním vzduchu mezi místnostmi.

Významnější rozdíl v teplotách mezi měřením a simulací v závěru 2. části měření byl způsoben absencí větrání u simulace. Právě tento rozdíl je vhodné zhodnotit. Při počátcích chladnutí stavby byla průměrná teplota místností jižní OJ cca 25,5 °C, u severní OJ cca 24,0 °C. Vnitřní teplota vzduchu OJ v simulaci klesla až na průměrnou teplotu cca 22,5 °C bez nočního větrání. V případě měření s menší mírou nočního větrání (i denního) to bylo cca 18,5 °C. Rozdíl cca 4 °C upozorňuje na zásadní úlohu a vliv nočního větrání stavby. Rozdíl 1,5, resp. 3 °C mezi počátkem chladnutí a konečnou teplotou u simulace upozorňuje na podstatný vliv slunečních zisků. Přestože byla venkovní teplota velmi nízká a slunečních zisků nebylo mnoho, bez nočního větrání vnitřní teploty zásadně neklesly.

Z hlediska vlivu tepelně akumulační hmoty nelze udělat žádné důležité konstatování nebo závěr. Byla prověřována pouze jedna konstrukční varianta.

G.4 Dlouhodobá simulace konstrukčních variant RD Moravany v DesignBuilder

G.4.1 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 akumulační hmoty na letní tepelnou stabilitu dané stavby.

G.4.2 Popis simulace

Simulace vychází ze srovnávací simulace letní tepelné stability pasivní stavby dvojdomu RD Moravany v části G.3. Stavebně je dům identický. Byly vytvořeny další konstrukční varianty, jedná se o lehké dřevostavby i o masivní těžké stavby s různou mírou vnitřní tepelně akumulační hmoty (Tabulka 8). Tabulka prezentuje konstrukční varianty zjednodušeně v podobě vnitřních vrstev akumulujících teplo. Detailní popis skladeb je součástí další kapitoly.

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 8 Zjednodušený popis konstrukčních variant RD Moravany – simulace DesignBuilder

Pro simulaci byla použita roční klimadata ASHRAE IWEC pro Bratislavu - rok 2002. Klimadata Bratislavy jsou v podstatě obdobná jako v případě Brna – tzn. sluneční záření J_M a venkovní teploty vzduchu θ_e. Hodnocené letní období trvá od 1. 6. až do 31. 8. 2002, tj. 3 měsíce a celkem 92 dní. Simulace tedy zastupuje celé letní období. Větrání přes den bylo voleno na úrovni n 0,3 h^{-1} a noční větrání bylo voleno jako automatické, dle výpočtového programu podle klimatických podmínek. Noční výměna vzduchu se tak pohybovala od 2 až po 6 h^{-1}, většinou však na úrovni 3 až 4 h^{-1}. Bylo voleno částečné stínění oken pro dosažení komfortní teploty. Nebylo uvažováno s vnitřními tepelnými zisky.

G.4.3 Konstrukční varianty

L1 – velmi lehká dřevostavba:

Obvodová stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	0	0,188	1 010	1
3	MW+sloupek	40	0,051	940	68
4	MW	125	0,041	840	22
5	MW+sloupek	40	0,051	940	68
6	DVD deska	60	0,047	1 260	260
7	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 14 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	MW+sloupky	120	0,051	940	68
3	SDK	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita κ: 15 kJ/(m²·K)					

Podlaha 1.NP (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	dlažba	10	1,200	850	2 000
2	OSB	30	0,150	1 580	630
3	EPS100	220	0,038	1 270	20
4	beton	150	1,360	1 020	2 300
Tepelná kapacita κ: 38 kJ/(m²·K)					

Strop (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	MW+sloupky	200	0,051	940	68
3	OSB	22	0,150	1 580	630
4	EPS100	10	0,038	1 270	20
5	OSB	30	0,150	1 580	630
6	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 15 kJ/(m²·K)					

L2 – lehká dřevostavba:

Podlaha stejná jako u varianty L1. Přibývá konstrukční OSB opláštění stěny pod SDK deskami.

Obvodová stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	DVD+lať	40	0,050	1 580	85
3	OSB	15	0,150	1 580	630
4	MW+sloupek	40	0,051	940	68
5	MW	125	0,041	840	22
6	MW+sloupek	40	0,051	940	68
7	DVD deska	60	0,047	1 260	260
8	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 20 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,150	1 580	630
3	MW+sloupky	120	0,051	940	68
4	OSB	12	0,150	1 580	630
5	SDK	13	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita κ: 24 kJ/(m²·K)					

Strop (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,150	1 580	630
3	MW+sloupky	200	0,051	940	68
4	OSB	22	0,150	1 580	630
5	EPS100	10	0,038	1 270	20
6	OSB	30	0,150	1 580	630
7	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 25 kJ/(m²·K)					

L3 – dřevostavba:

Oproti L2 navíc anhydrit v podlaze 50 mm.

Podlaha 1.NP (i-e)		**d**	**λ**	**c**	**ρ**
vrstva č.	**Název**	**[mm]**	**[W/mK]**	**[J/kgK]**	**[kg/m3]**
1	dlažba	10	1,200	850	2 000
2	anhydrid	50	1,350	850	2 050
3	EPS100	220	0,038	1 270	20
4	beton	150	1,360	1 020	2 300
Tepelná kapacita κ: 60 kJ/(m²·K)					

L4 – akumulační dřevostavba:

Oproti L3 trojité opláštění stěn SDK.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	38	0,220	1 060	750
2	vzduch	30	0,188	1 010	1
3	OSB	15	0,150	1 580	630
4	MW+sloupek	40	0,051	940	68
5	MW	125	0,041	840	22
6	MW+sloupek	40	0,051	940	68
7	DVD deska	60	0,047	1 260	260
8	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 35 kJ/(m^2·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	38	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,150	1 580	630
3	MW+sloupky	120	0,051	940	68
4	OSB	12	0,150	1 580	630
5	SDK	38	0,220	1 060	750
Tepelná kapacita κ: 35 kJ/(m^2·K)					

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	38	0,220	1 060	750
2	OSB	12	0,150	1 580	630
3	MW+sloupky	200	0,051	940	68
4	OSB	22	0,150	1 580	630
5	EPS100	10	0,038	1 270	20
6	anhydrid	50	1,350	850	2 050
7	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 37 kJ/(m^2·K)					

L5 – akumulační dřevostavba:

Oproti L4 betonová mazanina 70 mm v podlaze.

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	dlažba	10	1,200	850	2 000
2	beton	70	1,360	1 020	2 300
3	EPS100	220	0,038	1 270	20
4	beton	150	1,360	1 020	2 300
Tepelná kapacita κ: 66 kJ/(m^2·K)					

L6 – akumulační dřevostavba:

Varianta L3 s tím, že je v instalační mezeře obv. stěny vynechána DVD izolace a vnitřní stěny jsou realizovány v akumulační stěně CPP tl. 140 mm.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	30	0,188	1 010	1
3	OSB	15	0,150	1 580	630
4	MW+sloupek	40	0,051	940	68
5	MW	125	0,041	840	22
6	MW+sloupek	40	0,051	940	68
7	DVD deska	60	0,047	1 260	260
8	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 25 kJ/(m^2·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	790	2 000
2	CPP	140	0,860	900	1 800
3	VC omítka	15	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 72 kJ/(m^2·K)					

M1 – zděná stavba – pórobetonové tvárnice:

Pórobetonové zdivo a stropy. Podlahy s anhydritem.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	porobeton	300	0,084	1 000	300
3	EPS 70F	180	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 22 kJ/(m^2·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	porobeton	300	0,084	1 000	300
3	VC omítka	5	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 22 kJ/(m^2·K)					

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	30	0,188	1 010	1
3	porobeton	200	0,300	1 000	832
4	beton	50	1,360	1 020	2 300
5	EPS100	10	0,038	1 270	20
6	anhydrid	50	1,350	850	2 050
7	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 31 kJ/(m^2·K)					

M2 – zděná stavba – keramické tvárnice:

Obvodové jednovrstevné a vnitřní keramické zdivo, strop pórobetonový. Podlahy s anhydritem.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	20	0,990	790	2 000
2	heluz 440 0,30	440	0,133	960	650
3	VC omítka	20	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 44 kJ/(m²·K)					

M3 – zděná stavba – keramické tvárnice:

Oproti M2 keramické zdivo s vnějším zateplením, strop keramický.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	790	2 000
2	ker. Tvárnice	240	0,262	960	730
3	EPS 70F	210	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 46 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	15	0,990	790	2 000
2	ker. tvárnice	240	0,262	960	730
3	VC omítka	15	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 50 kJ/(m²·K)					

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	30	0,188	1 010	1
3	MIAKO+POT	150	0,420	1 000	1 060
4	beton	50	1,360	1 020	2 300
5	EPS100	10	0,038	1 270	20
6	anhydrid	50	1,350	850	2 050
7	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 34 kJ/(m²·K)					

H1 – zděná stavba – VPC tvárnice s nižší obj. hmotností:

VPC s nižší objemovou hmotností. Podlaha anhydrit. Strop keramický.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	VPC	200	0,370	1 000	1 200
3	EPS 70F	225	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 51 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	VPC	240	0,370	1 000	1 200
3	VC omítka	5	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 55 kJ/(m²·K)					

H2 – zděná stavba – VPC:

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	VPC	200	1,050	1 000	2 000
3	EPS 70F	225	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 72 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	VPC	240	1,050	1 000	2 000
3	VC omítka	5	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 76 kJ/(m²·K)					

H3 – zděná stavba – VPC tvárnice:

Oproti variantě H2 podlaha s betonovou mazaninou 70 mm.

Podlaha 1.NP (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	dlažba	10	1,200	850	2 000
2	beton	70	1,350	850	2 050
3	EPS100	220	0,038	1 270	20
4	beton	150	1,360	1 020	2 300
Tepelná kapacita κ: 66 kJ/(m²·K)					

H4 – zděná stavba – VPC tvárnice:

Oproti H3 železobetonový strop.

Strop (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	SDK	13	0,220	1 060	750
2	vzduch	30	0,188	1 010	1
3	žb	150	1,360	1 020	2 300
4	beton	50	1,360	1 020	2 300
5	EPS100	10	0,038	1 270	20
6	beton	70	1,360	1 020	2 300
7	dlažba	10	1,200	850	2 000
Tepelná kapacita κ: 40 kJ/(m²·K)					

H5 – monolitický železobeton:

Oproti variantě H4 stěny v monolitickém železobetonu.

Obvodová stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	železobeton	150	1,360	1 020	2 300
3	EPS 70F	235	0,040	1 270	15
4	omítka	7	0,800	900	1 550
Tepelná kapacita κ: 79 kJ/(m²·K)					

Vnitřní stěna (i-e)		d	λ	c	ρ
vrstva č.	Název	[mm]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m3]
1	VC omítka	5	0,990	790	2 000
2	železobeton	150	1,360	1 020	2 300
3	VC omítka	5	0,990	790	2 000
Tepelná kapacita κ: 81 kJ/(m²·K)					

G.4.4 Tepelná kapacita místnosti

Aby mohly být jednotlivé konstrukční varianty porovnávány, musí být srovnány z hlediska celkové tepelné kapacity místnosti C_m (viz Tabulka 9). Tepelné kapacity byly počítány přesnou metodou pro vícevrstvé konstrukce dle normy ČSN EN ISO 13786 [3] (viz část F.6). Odpory při přestupu tepla R_{si} byly použity stejné pro simulaci i výpočet tepelné kapacity – stěna/podlaha/strop = 0,13/0,17/0,10 (m²·K)/W. Tepelné kapacity jsou prezentovány jako měrné, vztažené na m³ vnitřního vzduchu místnosti.

RD Moravany_obývací pokoj_jižní OJ	plocha [m²]	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 mezibytová	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 9 Měrná tepelná kapacita místnosti $C_{m,V}$ konstrukčních variant a dosažené vnitří teploty pro obytný prostor 1.01- jižní OJ

Na výsledných hodnotách vidíme maximální rozptyl tepelné kapacity místnosti $C_{m,V}$. Velmi lehká dřevostavba má kapacitu rovno cca 30 kJ/(m³·K), velmi těžká železobetonová stavba má kapacitu rovno 90 kJ/(m³·K). Dřevostavba s mokrými podlahami a pórobetonová stavba jsou na obdobné úrovni C_m ~ 45 – 50 kJ/(m³·K). Keramické tvárnice a akumulační dřevostavba dosahují hodnot C_m ~ 60 – 65 kJ/(m³·K).

Vápenopískové tvárnice podle objemové hmotnosti dosahují hodnot $C_m \sim 65 – 85$ kJ/(m^3·K). Na tabulce lze pozorovat velký vliv stěn na celkovou tepelnou kapacitu místnosti $C_{m,V}$. Stěny mají totiž stejnou plochu jako podlaha a strop dohromady. Také jejich plošná tepelná kapacita může dosahovat vyšších hodnot, než je tomu o podlahy a zejména u stropu.

G.4.5 Výsledky

Výsledky jsou uvedeny jako nejvyšší dosažené teploty vnitřního vzduchu $\theta_{o,max}$ pro obývací pokoj 1.01 jižní OJ (Tabulka 10). Lze pozorovat, že se očekávaně přehřívají nejvíce lehké dřevostavby, nejméně pak zděné a masivní stavby. U dřevostavby bez akumulační hmoty L1 je dokonce dosaženo za hodnocené období 2x nejvyšší teploty vzduchu $\theta_{o,max}$ 30 °C. Naproti tomu nejtěžší železobetonová stavba H4 má nejvyšší četnost dosažené teploty 3x 25 °C. Jiné srovnání může být v rámci četnosti dní nad určitou únosnou teplotu – např. 24 °C (odhad nejvyšší komfortní teploty). Pokud je maximální četnost 92 dnů, dřevostavba L1 má četnost nad 24 °C, včetně, 41 dní, železobetonová stavba H4 má četnost pouze 3 dny. Standardní dřevostavba s anhydritovou podlahou L3 má nejvyšší dosažené teploty na úrovni 1x 29 °C (četnost 24°C = 29 dnů).

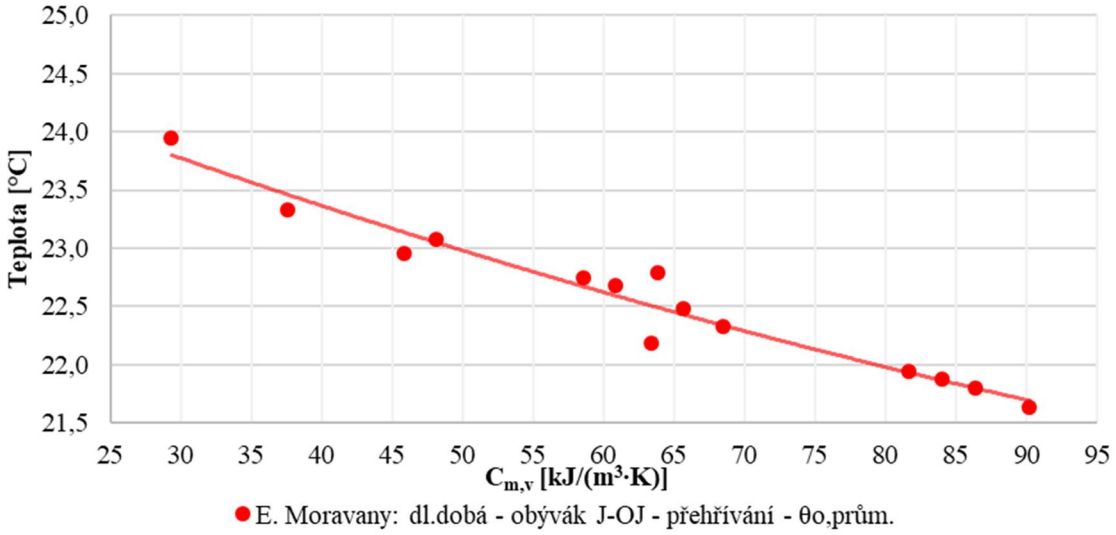
[°C]	L1	L2	L3	L4	L5	L6	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	H5
>30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	5	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	7	5	2	2	1	-	3	1	-	-	-	-	-	-
27	9	8	7	5	5	1	6	5	3	1	-	-	-	-
26	8	11	11	9	7	7	7	8	6	5	1	-	-	-
25	10	8	8	11	12	9	12	10	10	11	5	5	3	3
24	11	9	10	10	12	11	11	10	11	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 10 Četnosti nejvyšších teplot vzduchu $\theta_{ai,max}$ pro konstrukční varianty v obývacím pokoji 1.01-jižní OJ – 1.6 – 31.8 (simulace DesignBuilder)

Pórobetonová stavba M1 má nejvyšší teploty na úrovni 3 x 28 °C (četnost 24 °C = 28 dnů), stavba z keramických tvárnic M3 dospívá zase k nejvyšším teplotám 3 x 27 °C

(četnost 24°C = 19 dnů), stavba z vápenopískových tvarovek 1 x 26 °C (četnost 24 °C = 6 dnů).

Další interpretací výsledků může být průměrná teplota složená z nejvyšších dosažených vnitřních teplot vzduchu $\theta_{o,max}$ za vyšetřované období (Graf 32). 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 G.1.6).



Graf 32 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)

Pokud výsledné hodnoty proložíme křivkou, zjistíme, že vztah průměrné teploty $\theta_{o,max}$ a celkové tepelné kapacity místnosti $C_{m,V}$ je poměrně lineární. Se zvyšováním tepelné kapacity místnosti se lineárně snižuje průměrná teplota. Nejlehčí dřevostavba L1 dosahuje průměrné teploty cca 23,9 °C, nejtěžší železobetonová stavba H5 pak cca 21,7 °C, což je výrazný rozdíl (viz Tabulka 9). Standardní dřevostavby s mokrým systémem podlah se pohybují na úrovni cca 23,0 °C, varianty akumulačních dřevostaveb a těžkých zděných staveb na úrovni okolo cca 22,5 °C. Pouze velmi těžké zděné stavby mají průměrnou teplotu pod 22 °C.

G.4.6 Závěr

Byla provedena dlouhodobá simulace letní tepelné stability obývacího pokoje pasivního dvojdomu RD Moravany. 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. Tento rozdíl je samozřejmě výrazný a v rámci vnitřního komfortu jasně citelný. 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.

Z pohledu praktického srovnání konstrukčních systémů je nutné maximální možné uvedené rozdíly doplnit. Z různých důvodů (např. ekonomické, technologické) jsou málokdy stavby realizovány v extrémně lehké variantě dřevostavby, to samé platí o extrémní variantě železobetonové stavby. 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 (viz část E.5.9, E.6.9, G.1.5). 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.

Tak jako v části G.1.6 je pro závěr vodné vyjít z předpokladu, že těžká zděná stavba je zavedený a tudíž referenční konstrukční systém pro srovnání všech ostatních stavebních systémů. Tím je myšlena opět zděná stavba z keramických dutinových tvárnic. 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.

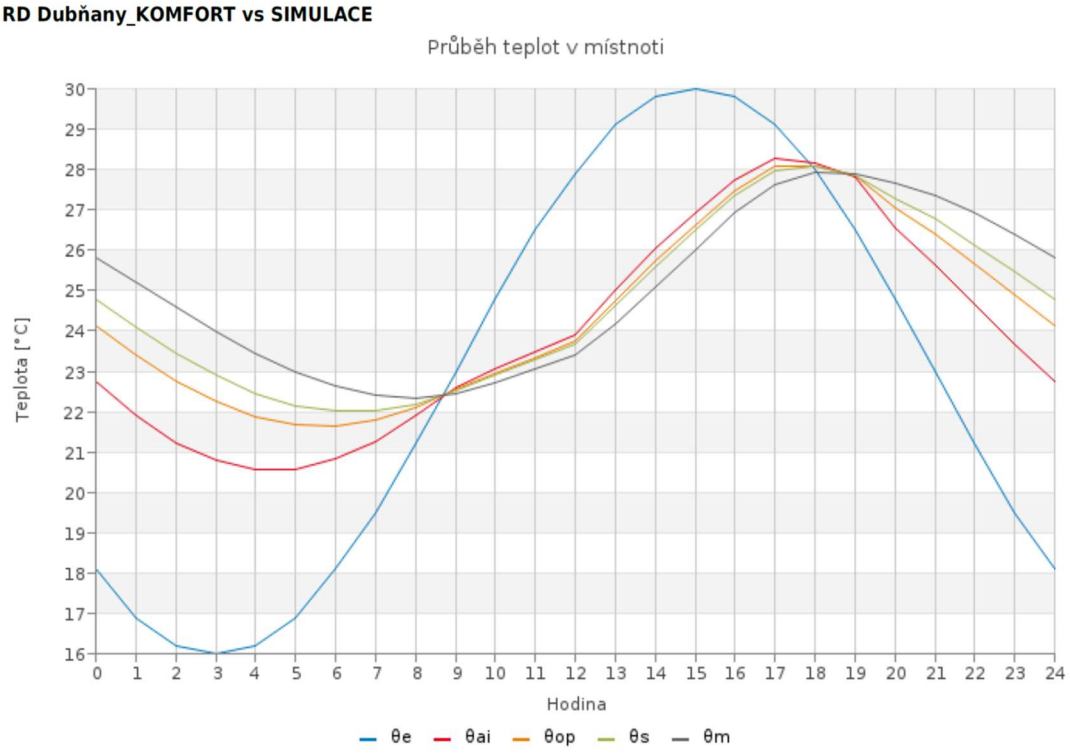
Pakliže dále připustíme, že letní tepelná stabilita je problematickou u dřevostaveb, bude stejnou měrou problematickou u méně těžkých staveb – tzn. pórobetonové stavby. Ve výsledcích jsou na tom totiž stejně jako lehké dřevostavby.

Pakliže bychom chtěli ještě více snížit přehřívání stavby oproti zděné stavbě z keramických tvárnic, bude vhodné použít masivní zdící prvky – tzn. vápenopískové tvárnice nebo železobetonový monolitický systém.

G.5 Srovnání programů KOMFORT a SIMULACE – kvazistacionární výpočet dle ČSN 730540

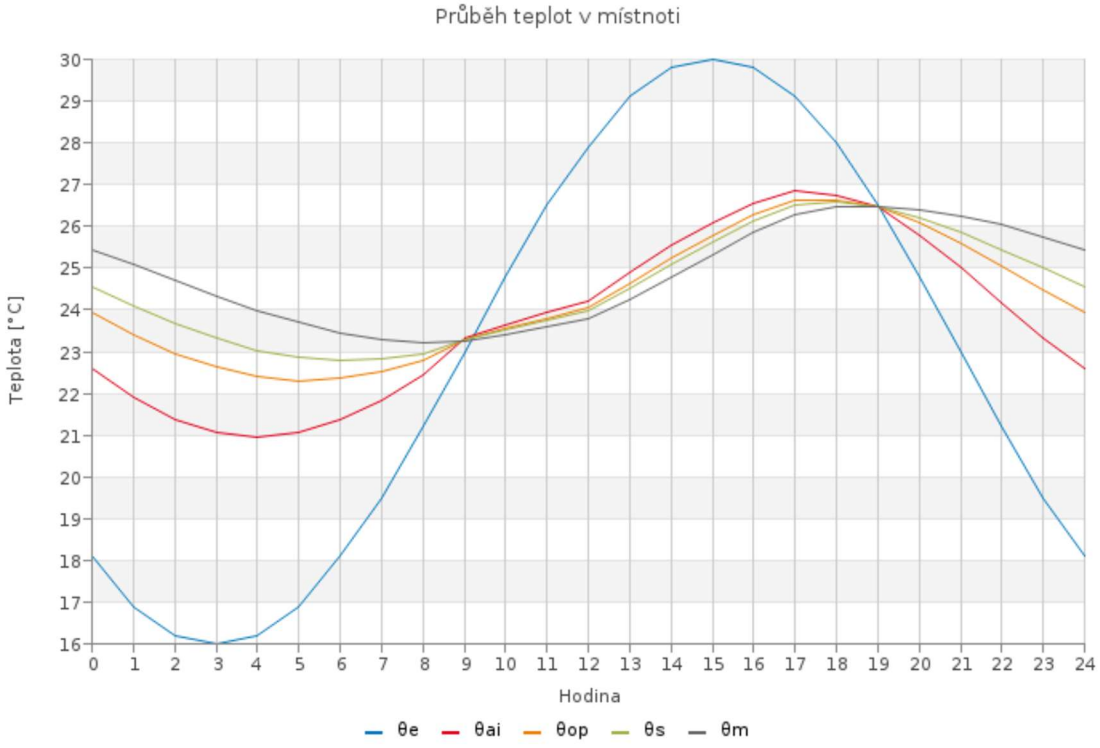
Bylo shledáno, že hlavní tělo práce je ještě vhodné doplnit o některé partie. První je srovnání kvazistacionárního výpočtu letní tepelné stability v programu SIMULACE s výpočtem provedeným v programu KOMFORT. Výpočetní program KOMFORT z balíčku DEKSOFT – Stavební fyzika počítá letní tepelnou stabilitu dle ČSN 730540-2 [5] standardně jako program SIMULACE. Autor měl však podezření, že výpočet plošné tepelné kapacity konstrukce κ podle SIMULACE je příliš optimistický. Program KOMFORT již v základě počítá přesnou metodou pro vícevrstvé konstrukce (viz část F.6).

Dle části práce E.5.5 byla vytvořena identická kvazistacionární simulace letní tepelné stability v programu KOMFORT (Graf 33). Nejvyšší teplota vzduchu v KOMFORTU vychází 28,3 °C, což je o mnoho více než v případě SIMULACE s 27,0 °C (výsledky SIMULACE viz část E.5.5). Rozdílné výsledky jsou způsobeny jinou hodnotou tepelné kapacity místnosti C_m. U SIMULACE je to 8100 kJ/K, u KOMFORTU je to 4990 kJ/K.



Graf 33 Průběh vnitřních teplot θ_{ai} a θ_o – KOMFORT - kvazistacionární výpočet ČSN 730540 (noční n=6 h^{-1}, varianta L1)

V programu KOMFORT byla posléze navýšena tepelná kapacita místnosti zvýšením objemové hmotnosti SDK desek tak, aby dosahovala výsledku cca 8100 kJ/K. Nejvyšší teplota vzduchu poté klesla na úroveň 27,1 °C, což je právě výsledek SIMULACE. K simulaci L1 v KOMFORTU byla dále provedena simulace varianty M1 s keramickým zdivem. Graf 34 zobrazuje nejvyšší teplotu vzduchu u této varianty 26,8 °C, tedy o 1,5 °C níže než u varianty L1. U SIMULACE byl tento rozdíl 2,1 °C. V programu Bsim byla hodnota pro variantu L1 26,1 °C a pro variantu M1 24,1 °C.



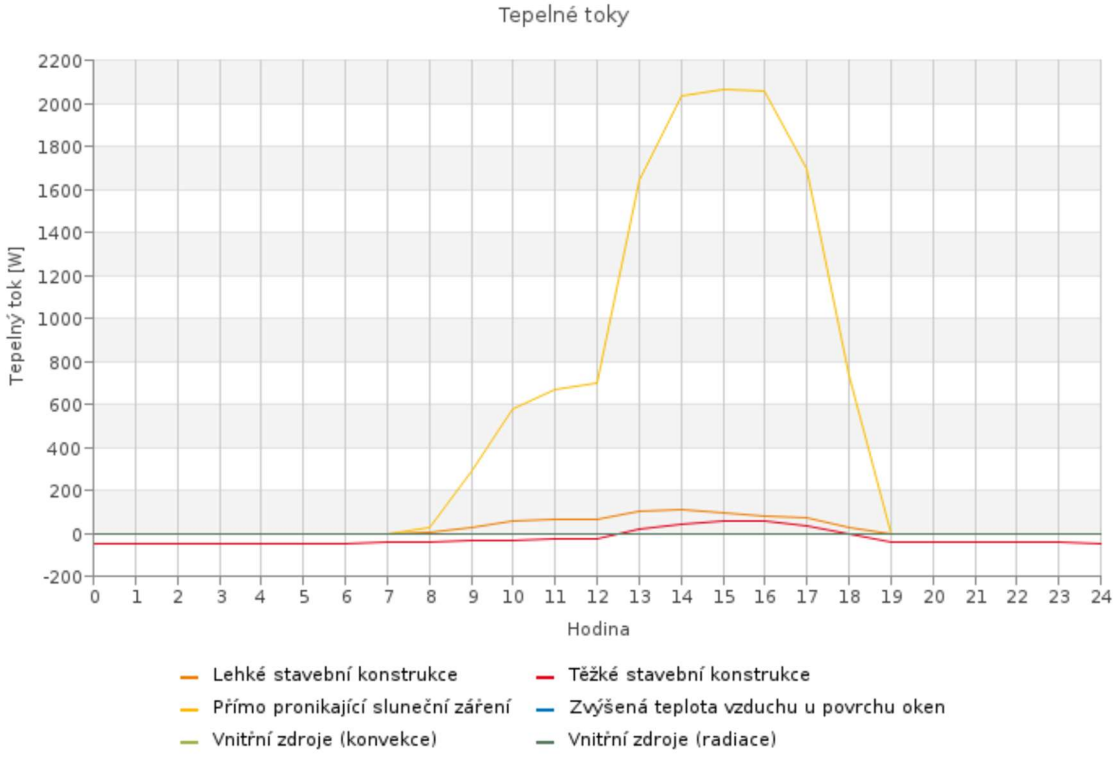
Graf 34 Průběh vnitřních teplot θ_{ai} a θ_o – KOMFORT - kvazistacionární výpočet ČSN 730540 (noční n=6 h^{-1}, varianta M1)

Z výsledků je patrné, že pro simulaci letní tepelné stability dle ČSN 730540-2 je neméně důležitý přesný výpočet tepelné akumulace místnosti. Program SIMULACE tento výpočet v základě neposkytuje. I tak však samotný princip kvazistacionární simulace dle zmíněné normy pravděpodobně neposkytuje věrohodné výsledky. Rozdíl výsledků podrobné kvazistacionární simulace mezi BSim a KOMFORT se ještě prohloubil. Kvazistacionární simulace letní tepelné stability dle ČSN 730540-2, zjednodušenými výpočetními nástroji, tedy není zcela věrohodná a tak se nehodí pro hodnocení vlivu tepelné akumulace stavby v rámci letního období.

G.6 Tepelná bilance místnosti

Pro rámcové pochopení problematiky je taktéž vhodné se krátce zabývat tepelnou bilancí místnosti. Místnost ovlivňuje tepelná zátěž neprůsvitnými konstrukcemi, průsvitnými konstrukcemi, výměnou vzduchu a vnitřními tepelnými zisky. Prostup tepla neprůsvitnými konstrukcemi se hůře hodnotí, jelikož je tento proces neustálený a v čase se mění. Průsvitnými konstrukcemi vniká teplo prostupem tepla, ale zejména v podobě slunečních zisků. Výměna vzduchu ovlivňuje tepelně interiér větráním (přirozeně nebo nuceně vzduchotechnikou), ale také netěsností samotné stavby.

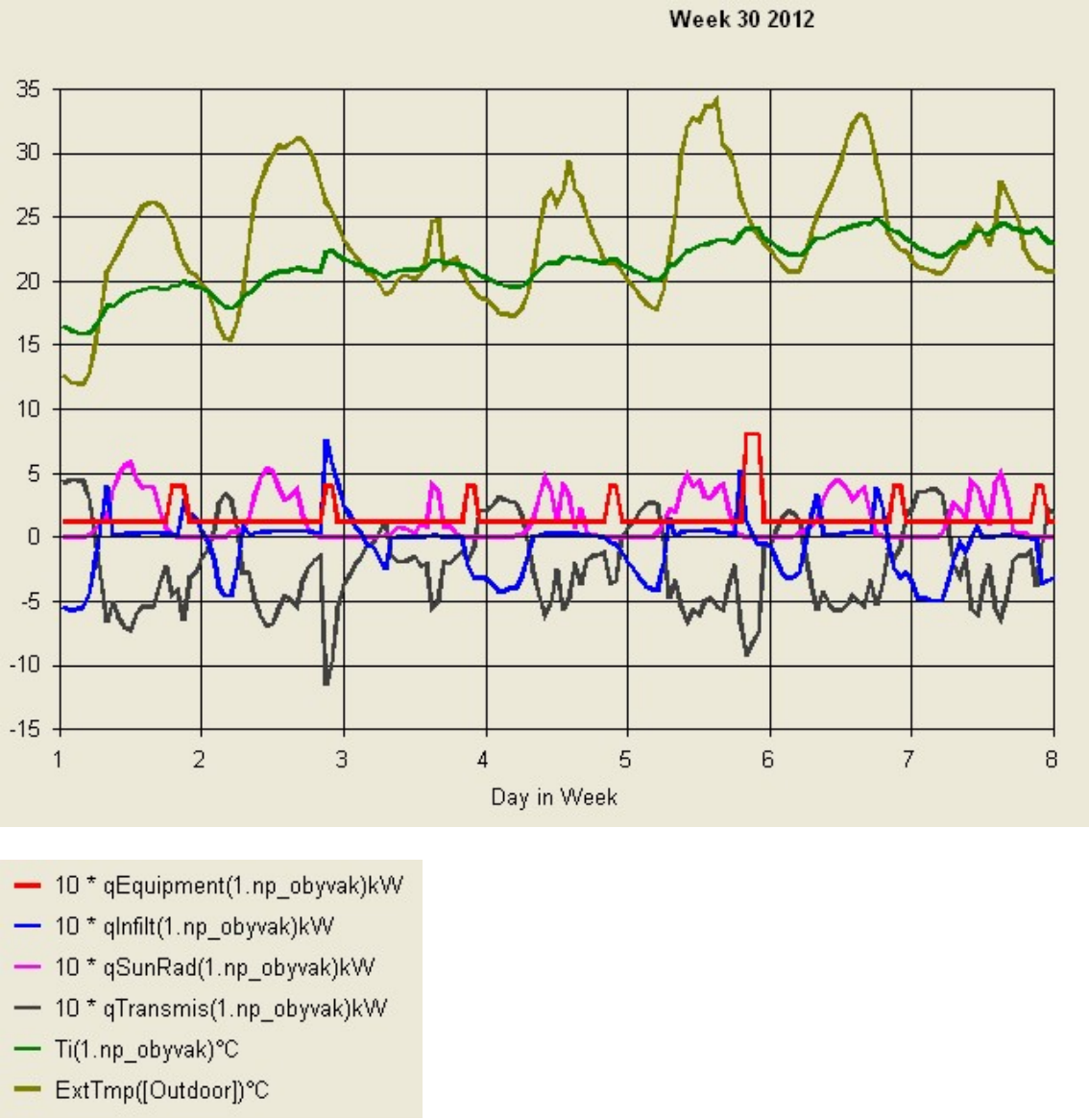
Graf 35 zobrazuje tepelné toky obytného prostoru RD Dubňany ze simulace programu KOMFORT (viz část G.5). Je zde patrný zásadní vliv slunečních tepelných zisků – odpolední tepelná zátěž až cca 2 kW. Tepelná zátěž neprůsvitnými konstrukcemi je oproti slunečnímu záření velmi malá.



Graf 35 Tepelné toky místnosti – KOMFORT - kvazistacionární výpočet ČSN 730540

Graf 36 popisuje týdenní tepelnou zátěž obytného prostoru RD Dubňany zakončenou dnem 29. 7. 2012 v simulaci BSim. Veličina *qSunRad* popisuje sluneční tepelné zisky, které v maximech dosahují zhruba 0,4 kW. Přestože jsou okna stíněna u Bsim o trochu více než v KOMFORTU, můžeme pozorovat u KOMFORTU 5x vyšší

tepelnou zátěž v podobě 2 kW. Veličina *qEquipment* popisuje tepelné zisky od spotřebičů. Veličina *qInfilt* popisuje tepelné zisky, resp. ztráty větráním a *qTransmis* popisuje tepelnou energii prostupující přes obalové konstrukce. Součet všech veličin musí být 0, tím je tepelná bilance místnosti vyrovnaná. Na zobrazeném týdnu je kvůli bezoblačném dnům a vysokým venkovním teplotám vidět postupné zvyšování vnitřní teploty. Noční větrání nestačí odvádět tepelné zisky a místnost se přehřívá, tudíž dochází ke zvýšenému ukládání tepla ve stavebních konstrukcích.



Graf 36 Tepelná zátěž obytného prostoru RD Dubňany – simulace Bsim

H Dotazník na letní tepelnou stabilitu

Bylo osloveno několik vlastníků pasivních domů s dotazem na jejich spokojenost. Dotazník a popis letní tepelné stability jsou samozřejmě do jisté míry subjektivní a zjednodušené.

RD Vracov – pasivní, velmi lehká dřevostavba:

Stavba nemá žádnou akumulační hmotu (pouze SDK). Navíc je v obytném prostoru na J stranu 7 m dlouhý prosklený výkladec. Vlastník konstatuje, že v létě při celodenním venkovním stínění byly uvnitř teploty až 27 °C v podkrovních pokojích (větrané jen ráno krátce) a v obytném prostoru až 25 °C (větraném večer a ráno). Když zasvítí slunce, výrazně roste teplota interiéru. Rád by měl nejvyšší teploty v interiéru max. 24 °C, proto uvažuje o strojním chlazení interiéru. Vlastník je toho názoru, že lehké stavby se přehřívají více než zděné stavby. Vlastníci nevětrají v noci – důvod hluk z ulice, hmyz. Jsou toho názoru, že se teprve učí stavbu užívat. Celé léto je vzduchotechnika v provozu – tzn. obrácená rekuperace vzduchu. Přestože je v kotelně s peletkovým kotlem poměrně teplo, vlastník nepozoruje, že by kotel ovlivňoval teplotu přilehlého obytného prostoru.

RD Úvaly – pasivní, zděná VPC stavba:

Dům využívá nuceného větrání kompaktní jednotkou s přichlazováním vzduchu. V interiéru je proto stále 22 °C, vlastníci jsou s tímto velmi spokojeni. Venkovní velká okna do obytného prostoru jsou stíněna pergolou.

RD Rychnov u Jablonce n./Nis. – pasivní, lehká dřevostavba:

Dům nemá obecně velké prosklené plochy, okna jsou stíněna přesahem. Slunce je na západě stíněno lesem, klima je zde obecně chladnější. V blízkém Turnově je večer teplota o 3-5 °C vyšší. V noci klesá teplota běžně pod 18 °C. Vlastník je toho názoru, že nejvíce ovlivňují letní tepelnou stabilitu vnitřní tepelné zisky. Pakliže se nevychladí nočním větráním interiér na 20 °C, vzroste ve dne teplota na 24 – 26 °C, když je venku 30 °C. Dopoledne se do cca 10:30 větrá okny na západ, venku je cca 23 °C, větrat se začíná až večer. Vlastník nevaří během dne, protože to zásadně zvyšuje teplotu interiéru. Ve stavbě je TČ pro chlazení, používá se pouze v delších obdobích tepla 28-30 °C, což je jen výjimečně. Vlastník pozoroval znatelné snížení večerní teploty místností, když byly vyměněny stávající spotřebiče za úspornější - LED žárovky, LED televize, úspornější trouba. Došlo obecně ke snížení teploty o 1-2 °C, kuchyně se již nepřehřívá.

Pro vlastníka je nejvyšší komfortní teplota ve výši 24-25 °C. Vlastník není toho názoru, že lehké stavby se přehřívají více než zděné stavby (jsou zde sádrokartony a stavba rychleji vychladne).

RD Hustopeče – pasivní, velmi těžká zděná VPC stavba:

Stavba nemá velká okna na JV až JZ. Vlastník konstatuje, že pokud je venku ve dne teplota 28 – 30 °C a v noci 18 – 22 °C a okna jsou z většiny stíněna žaluziemi, je vnitřní teplota 23 – 24 °C. V noci je stavba větrána, přes den je spuštěna cirkulace vzduchotechniky. Dříve docházelo za stejného stavu k přehřívání stavby na 26 – 28 °C vlivem IZT zásobníku pro akumulaci TV ze solárních kolektorů. Zásobník se musel lépe zaizolovat a snížila se i teplota akumulované TV. K přehřívání interiéru docházelo také při venkovních denních teplotách vyšších než 30 °C a nočních teplotách neklesajících pod 24 °C. Stavba den po dni zvyšovala svoji teplotu, tyto dny jsou řešeny strojním chlazením (cca 20 dní v roce). Pokud jsou teploty vyšší než 34 °C, regulace chlazení řízeně zvedne také teplotu interiéru s rozdílem 10 °C. Dům má velkou tepelnou setrvačnost, krátkodobé stínění se na teplotě nijak neprojeví. Vlastník je toho názoru, že nejvíce ovlivňují teplotu vnitřní tepelné zisky. Masivní vápenopískové konstrukci vlastník věří, vyrovnáná totiž teploty a je stabilnější. Stavebníka překvapil vliv tepelné ztráty IZT zásobníku na vnitřní teplotu a taktéž vyšší teploty ve stavbě vůbec (optimalizace letní tepelné stability v PHPP).

RD Hrubá Vrbka – pasivní, akumulační dřevostavba:

Stavba nemá velká okna na JV až JZ. Vlastník konstatuje, že se stavba přehřívá. Není zatím instalováno venkovní stínění oken. Stavba se větrá jen v noci. Když je v noci venku horko, větrá se jen zlehka. Teploty přes den dosahují 26 °C. Zvenku vlastník nalepil termickou fólii proti přehřívání, což trochu pomohlo. Aby se dům nepřehříval větrá se v noci, nezapíná se trouba. Vlastníci konstatují, že maximální snesitelná teplota je pro ně 25 °C. Vlastník není toho názoru, že lehké stavby se nepřehřívají více než zděné stavby (je na tom naopak lépe, uchovává chlad). Pro dosažení komfortní teploty vlastníkům stačí pořídit jenom venkovní žaluzie, chlazení je drahé a není ho třeba. Vlastníky překvapil vliv slunečních zisků přes okna, v zimě jsou příjemné, v létě zcela naopak.

I Možnosti dalšího výzkumu

Autor předpokládá, že tato práce odpoví na základní otázky zkoumané problematiky. V průběhu práce se objevily některé skutečnosti, které by bylo vhodné více prozkoumat za účelem případného zpřesnění závěrů práce. Autor také experimentálně měřil a simuloval více staveb, než je uvedeno v této práci. Je nadále vhodné tyto údaje zpracovat a vytvořit tak větší a reprezentativnější vzorek zkoumaných objektů.

Okruhy prohloubení znalostí a obecná doporučení:

1. Tepelná akumulace a kapacita – podrobněji zkoumat v rámci experimentu a simulace jednotlivé konstrukce, např. simulace ANSYS
2. Tepelná bilance místnosti – zjistit skutečnou tepelnou zátěž místnosti všemi faktory (např. prostup neprůsvitnými konstrukcemi, vnitřní tepelné zisky)
3. Tepelná zátěž vnitřními zisky – zdá se, že vnitřní tepelné zisky mohou hrát zásadní roli v přehřívání interiéru stavby (ne/úsporné spotřebiče)
4. Odpor při přestupu tepla R_{si} – zásadně ovlivňuje výslednou tepelnou kapacitu konstrukce, možnost zvýšení tepelné akumulace (např. vyšší větrání)
5. Výměna vzduchu u přirozeného a nuceného větrání – noční větrání zásadně ovlivňuje výslednou vnitřní teplotu, je vhodné zjistit nejvyšší realizovatelné výměny vzduchu n u přirozeného větrání (1 okno, 2 okna, plně otevřená, pootevřená) nebo nuceného větrání vzduchotechnikou (omezená možnost velkých výměn vzduchu) – také problematika průvanu, hluku, bezpečnosti
6. Režimy větrání vzhledem k tepelné kapacitě konstrukce – podrobněji rozebrat reálné provozní režimy větrání stavby s ohledem na lehké vs. těžké stavební systémy (viz bod 5.)
7. Vývoj nebo popis ideálního tepelně akumulačního materiálu pro velmi lehké stavby – stanovit minimální parametry pro zlepšení tepelného komfortu uvnitř stavby (vyloučení mokrých procesů, minimální tloušťka, popř. obj. hmotnost daného materiálu)
8. Experiment a simulace – nezapomenout se soustředit na parciální experimenty a simulace. Pakliže jsou zkoumány velké složité systémy (budova a mnoho faktorů), je o to složitější popsat váhu každého jednotlivého faktoru.

J Závěr

J.1 Přístup k hodnocení, diskuze

1. V práci bylo zjištěno, že je méně vhodné používat pro hodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty výsledky z kvazistacionární simulace dle ČSN 730540-2 [5] – programy SIMULACE, KOMFORT. Tyto programy můžou tepelnou kapacitu κ zejména u těžkých konstrukcí nadhodnocovat. Výsledky vzhledem k vnitřní tepelně akumulační hmotě jsou taktéž nadhodnocené a obecně nejsou zcela důvěryhodné. (části: E.5.7, G.5, G.6, E.5.10)
2. Pro závěry práce je vhodné naopak využít výsledků podrobných dynamických numerických simulací, které poskytují větší jistotu v dosažených hodnotách – programy BSim, DesignBuilder. (části: E.5.10, E.7.4, G.1.6, 0)
3. Pro hodnocení výsledných teplot uvnitř místnosti může být použita jak vnitřní teplota vzduchu θ_{ai}, tak operativní teplota θ_o nebo teplota kulového teploměru θ_g. V měřeních a simulacích bylo prokázáno, že nabývají velmi podobných hodnot. (části: E.5.5, E.6.4, G.3.5)
4. Hodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty nelze v této práci provést zcela objektivně. Hodnocení bude vždy vázáno na konkrétní provedená měření a zejména simulace. Závěry budou stanoveny prakticky z měření a simulací dvou pasivních objektů. (části: G.1, G.4)
5. Při zjišťování vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty má pro praktické použití váhu spíše relativní hodnocení než absolutní. Ekonomie a technologie výstavby nám umožňuje většinou použít omezené spektrum stavebních konstrukcí. Prakticky tedy zjišťujeme relativní srovnání v praxi obvykle zaužívaných konstrukčních systémů s ohledem na to, co by se dalo v dané situaci zlepšit. Pro relativní srovnání potřebujeme výchozí bod – referenční konstrukční systém, viz níže.
6. Tradičním a dlouhodobě zaužívaným stavebním systémem jsou v ČR zděné objekty z lehčených tvárnic – nejčastěji keramické dutinové nebo pórobetonové tvárnice. Těžší stěny z vápenopískových tvárnic nejsou zatím hlavním proudem zděné výstavby. Železobetonové stavby jsou v obytné výstavbě spíše okrajovou

záležitostí. Pro relativní srovnání proto bude použit referenční konstrukční systém v podobě keramických dutinových tvárnic. Obytné stavby jsou velmi často stavěny z tohoto materiálu (je pravděpodobně vůbec nejpoužívanější) a stavebníci jej berou jako tradiční stavební materiál, mají k němu kladný vztah. Keramické tvárnice navíc mají dobrou tepelnou akumulaci.

7. Práce uvádí, že nejvyšší potenciál v celkové vnitřní tepelné akumulaci místnosti $C_{m,V}$ mají stěny. Je tedy vhodné se zabývat v první řadě konstrukcí obvodových a vnitřních stěn a příček. Pro hodnocení této práce je tedy možné používat pro reprezentaci konstrukčních systémů materiál stěn. (části: F.10)

8. Při výpočtech tepelné kapacity konsturkcí bylo potvrzeno, že mezi konstrukčními systémy je poměrně značný rozdíl. Vzhledem k poměrně odlišným výsledkům tepelné stability v rámci zděných a monolitických staveb by mohla vzniknout pro účely jednoduchého popisu tepelné setrvačnosti konstrukce navíc nová kategorie – velmi těžké konstrukce. Definice této kategorie by mohla znít tak, že plošná hmotnost této konstrukce po hlavní tepelnou izolaci je vyšší než cca 300 kg/m^2 (viz Tabulka 11). (části: G.1, G.4)

Konstrukce stěny Značka	**Lehká konstrukce (stavba) L**	**Těžká konstrukce (stavba) M**	**Velmi těžká konstrukce (stavba) H**
Plošná hmotnost vrstev [kg/m^2]	< 100	100 - 200	> 300

Tabulka 11 Návrh nové kategorie hmotnosti, resp. tepelné setrvačnosti konstrukcí

9. V rámci měření a simulace zimní tepelné stability je konstatováno, že tato problematika již není u pasivních domů, bez ohledu na jejich vnitřní tepelně akumulační schopnosti, aktuální. Pasivní stavba vychládá v rámci obvyklé každodenní otopné přestávky zanedbatelně. Volba stavebního systému v rámci tepelně akumulační schopnosti stavby tak nehraje podstatnou roli. (části: E.8.4).

J.2 Obecné hodnocení

J.2.1 Absolutní hodnocení – faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu

Při hodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty na letní tepelnou stabilitu pasivních objektů je vhodné začít všemi faktory, které letní tepelnou stabilitu ovlivňují. V práci bylo měřeno či simulováno mnoho staveb při různých provozních podmínkách. Z většiny těchto měření a simulací vyplívá, že vnitřní tepelně akumulační hmota není hlavním faktorem ovlivňujícím vnitřní teplotu (viz část E.7.4). Interpretace jednotlivých faktorů je obtížná, jelikož jsou jednotlivé faktory do jisté míry provázané a taktéž mohou nabývat různých hodnot. 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**. Ty mohou být dány velikostí a orientací oken, také jejich stíněním. Vliv tohoto faktoru může navýšit vnitřní teplotu v základě o 2,0 – 6,0 °C. (části: E.2.6, E.6.4, E.7.4 a jiné)

2. O trochu méně ovlivňuje vnitřní teplotu samotné **větrání místnosti**. Tento faktor je tedy dán hodnotou **výměny vzduchu v místnosti** a také časem, kdy je realizována. Ve dne je větrání tepelnou zátěží místnosti, v noci naopak jejím chlazením. Vliv tohoto faktoru může navýšit vnitřní teplotu v základě o 1,0 – 3,0 °C. (části: E.2.6, E.5.5, E.5.10, E.7.4 a jiné)

3. Dalším faktorem jsou **vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů**. Vnitřní tepelná zátěž může nabývat velmi rozdílných hodnot a ovlivňují ji zejména vnitřní spotřebiče. Tento faktor nebyl v práci zkoumán tak podrobně jako ostatní faktory. Přesto je zřejmé, že jeho vliv je podstatný. Vliv tohoto faktoru může navýšit vnitřní teplotu v základě o 1,0 – 3,0 °C, velice snadno však i více. (části: E.7.4, G.6, H a jiné)

4. Dalším faktorem je samotný **vliv vnitřní tepelně akumulační hmoty**. Vnitřní tepelnou akumulaci ovlivňuje volba konstrukčního systému, popřípadě samotné vnitřní povrchové úpravy. Vliv tohoto faktoru může navýšit vnitřní teplotu v základě o 0,5 – 1,5 °C. (podrobné hodnocení v dalších částech)

5. Posledním faktorem jsou **tepelné zisky neprůsvitnými konstrukcemi** sousedícími s exteriérem. Tento faktor se v práci zkoumal poměrně obtížně a jeho zhodnocení není taktéž jednoduché. V rámci odborného odhadu z několika částí práce se dá říci, že vliv tohoto faktoru může navýšit vnitřní teplotu v základě o max. 0,5 °C. Konstatování platí pro pasivní domy, kde mají obalové konstrukce vysoký tepelný odpor. (části: E.7.4, G.6, H a jiné)

Interpretace výsledků je určitým zjednodušením a je uvažována s ohledem na reálně možné o obvyklé nepříznivé ovlivnění teploty místnosti daným faktorem. Výše uvedené rozdíly v teplotách mohou být ještě vyšší, pakliže budeme uplatňovat extrémní hodnoty či situace s daným faktorem.

J.2.2 Absolutní hodnocení – vliv vnitřní tepelně akumulační hmoty

Pro hodnocení vlivu vnitřní tepelně akumulační hmoty je vhodné využít zejména výsledky numerických simulací letního přehřívání místností. V práci bylo představeno vícero různorodých simulací. Simulace byly krátkodobé i dlouhodobé a byly prováděny za různých okrajových podmínek. Pro interpretaci výsledků se hodí nejlépe popis vztahu měrné tepelné kapacity místnosti $C_{m,V}$ vztažené na m^3 objemu místnosti a její nejvyšší dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$, popř. $\theta_{o,max}$. Toto zobrazuje hlavní závěrečný graf této práce - Graf 37.

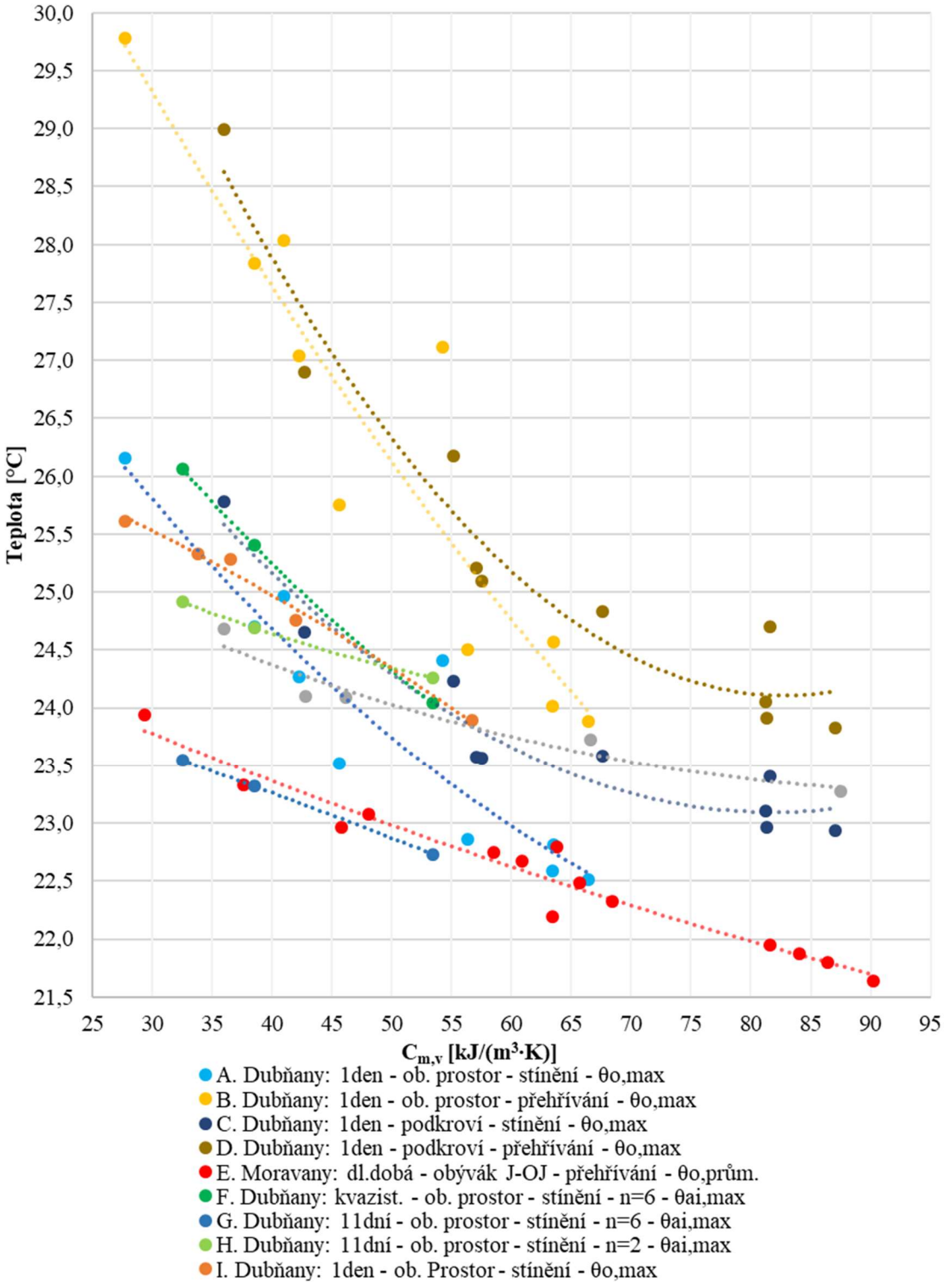
V tomto grafu jsou zobrazeny stěžejní simulace této práce. Každá simulace v podobě skupiny bodů je doplněna spojnicí trendu. Proložením bodů vzniknou povětšinou přímky. Vnitřní teplota vzduchu $\theta_{ai,max}$ je tedy zhruba lineárně závislá na měrné tepelné kapacitě místnosti $C_{m,V}$. Výsledky ze simulace programu BSim se více rozcházejí, výsledky ze simulace z programu DesignBuilder jsou více jednotné. Sklon křivky pak určuje, jak velké jsou rozdíly v dosažené teplotě $\theta_{ai,max}$ mezi konstrukčními variantami v podobě jejich tepelné kapacity $C_{m,V}$ rozdíly. U simulací místnosti, která není kritická a nepřehřívá se, je spojnice trendu vodorovnější. U přehřívaných místností je spojnice trendu více svislá, protože jsou mezi jednotlivými konstrukčními variantami větší rozdíly. Vyhodnocení lze provést ve 2 úrovních:

a) Body = výsledek simulace (více přesné v rámci konkrétních konstrukčních variant)

b) Spojnice trendu = obecné chování (méně přesné v rámci konkrétních konstrukčních variant)

Pro reprezentaci výsledků je vytořena Tabulka 12. V legendě tabulky jsou kategorizovány jednotlivé konstrukční systémy v podobě barev a zkratek (L1 až H3) a popisu. V rámci každé řady výsledků resp. teplot byla přiřazena barva danému konstrukčnímu systému v rámci tepelné kapacity $C_{m,V}$ a dosažené teploty.

Jsou zde uvedeny čtyři základní typy výsledků. Výstupy v 1. řádku *Průměrný den (také průměr ze všech dní)* jsou hlavním výsledkem této práce. Tento výsledek popisuje a reprezentuje rozdíly v dosažené teplotě pro standardní místnost a standardní den bez přehřívání interiéru. Vychází ze spojnice trendu - *Moravany: dl.dobá - obývák J-OJ - přehřívání - θo,prům* (●), a tedy z výsledků dlouhodobé simulace konstrukčních variant RD Moravany. Ty jsou taktéž oproti výsledkům simulace RD Dubňany více konzistentní.



Graf 37 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/(m³·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 vápenopískový zděný systém	- zdivo a ŽB stropy, podlahy mokrý systém
H3 železobetonový monolit. systém	- stěny i stropy, podlahy mokrý systém

Tabulka 12 Vliv měrné tepelné kapacity místnosti $C_{m,V}$ na nejvyšší dosažené teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ popř. $\theta_{o,max}$ – srovnání konstrukčních systémů

Sklon křivky odpovídá i jiným spojnicím trendů pro nepřehřívající se místnosti v rámci simulace pro jeden den. Tyto výsledky jsou v tabulce stanoveny ze spojnice trendu (a) s přihlédnutím ke skutečným výsledkům simulací (b). Výsledky ukazují, že mezi nejlehčím možným (velmi lehká dřevostavba L1 $C_{m,V}$ – cca 30 kJ/(m³·K)) a nejtěžším možným konstrukčním systémem (monolitický železobeton H3 $C_{m,V}$ – cca 90 kJ/(m³·K)) jsou v rámci spojnice trendu rozdíly cca 2,1 °C. Tento výsledek zastupuje jak standardní den bez přehřívání, tak celé letní období. V rámci letního období výsledek znamená, že každý den se velmi lehká stavba přehřívala o 2,1 °C více než velmi těžká stavba. Z tohoto pohledu je vliv vnitřní tepelné akumulace stavby na vnitřní teplotu rozhodně nezanedbatelný.

Pakliže se budeme soustředit na konkrétní izolované dny, popisují je další řádky tabulky. Rozdíl mezi konstrukčními systémy v $\theta_{ai,max}$ může být ještě vyšší v dny, kdy dochází k přehřívání místnosti (2. a 3. řádek). 2. řádek *Den s vyšší tepelnou zátěží (některé dny) standardní místnost* reprezentují výsledky pro standardní místnost v dny s vyšší tepelnou zátěží, kdy se interiér mírně přehřívá. Vychází ze spojnice trendu - *Dubňany:*

1den – podkroví – stínění - θo,max (●), a tedy z výsledků jednodenní simulace konstrukčních variant RD Dubňany – podkrovní místnost. Zde jsou rozdíly v nejlehčí a nejtěžší konstrukční variantě v rámci spojnice trendu cca 3,1 °C. Pakliže změníme standardní místnost za místnost kritickou s vyššími slunečními zisky, přejdeme k řádku 3. *Den s vyšší tepelnou zátěží (některé dny) kritická místnost*. Výsledky vychází ze spojnice trendu - *Dubňany: 1den – ob. prostor – stínění - θo,max* (●). Rozdíly v nejlehčí a nejtěžší konstrukční variantě se v rámci spojnice trendu zvětší až na cca 3,8 °C. Výsledky v tabulce pro 2. a 3. řádek jsou stanoveny čistě ze spojnice trendu (a).

Rozdíl v dosažených tepotách mezi konstrukčními systémy může být také naopak zanedbatelný, pakliže dojde k poklesu tepelné zátěže a těžká stavba je již naakumulovaná – 4. řádek *Den při naakumulování těžké stavby (některé dny)*. Výsledky jsou stanoveny s přihlédnutím k simulaci v části E.5.9.

Hlavní výsledek v 1. řádku všechy tyto výsledky z ostatních řádků zastupuje, protože představuje jejich průměr.

J.2.3 Relativní hodnocení – vliv vnitřní teplně akumulační hmoty

Při relativním hodnocení je zásadní interpretace výsledků. Proto byl stanoven srovnávací referenční systém - keramický zděný systém. Tabulka 12 zobrazuje rozdíly jednotlivých konstrukčních systémů v porovnání s tímto referenčním konstrukčním systémem. Jak bylo řečeno v předcházející kapitole, pro srovnání a výsledné hodnocení má být využit řádek. *1. Průměrný den*.

Pakliže srovnáme pro místnost a standardní a průměrný den (Tabulka 12 - 1. řádek) velmi lehkou dřevostavbu L1 s referenční zděnou stavbou z keramických tvárnic M2, dospějeme v rámci výsledné vnitřní teploty vzduchu $\theta_{ai,max}$ k vyššímu výsledku o zhruba +1,4 °C (■). Tento rozdíl je již znatelný. Pakliže v dřevostavbě bude menší množství tepelné akumulace v podobě zdvojeného opláštění stěn a stropů (pohledová SDK + konstrukční OSB deska), zmenší se rozdíl na zhruba +0,9 °C – varianta L2 (■). Pokud do této dřevostavby přidáme ještě další tepelnou akumulaci v podobě mokrého systému podlahy (anhydrit či beton), bude rozdíl zhruba +0,5 až +0,7 °C – varianta L3 (■). Výsledek +0,5 °C vychází ze simulace a výsledek +0,7 °C odečtem ze spojnice trendu. Tyto dřevostavby jsou v praxi realizovány velmi často a můžou být vnímány jako referenční dřevostavba pro srovnání. S dalším přidáním akumulační hmoty (2 x SDK) se může rozdíl zcela smazat – varianta L4 (■). Dosáhne se tedy stejných teplot jako u referenčního systému nebo i nižších v případě vyloženě akumulační dřevostavby (□). Za zmínku stojí pórobetonový konstrukční systém, který je srovnatelný, se standardními realizovanými dřevostavbami +0,6 °C (■). U vápenopískového zdiva pozorujeme naopak nižší výsledné hodnoty od zhruba -0,2 °C (■) až po zhruba -0,7 °C (■) dle objemové hmotnosti tvárnic. Železobeton dosahuje nejnižší teploty zhruba - 0,9 °C (■).

J.3 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). (viz část J.2.1).

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 J.2.2). Stejné 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 kJ/(m^3·K), nejtěžší pak železobetonová monolitická stavba $C_{m,V}$ = 90 kJ/(m^3·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 kJ/(m^3·K)) vs. zděná stavba z keramických tvárnic ($C_{m,V}$ = 65 kJ/(m^3·K)) nebo zděná pórobetonová stavba ($C_{m,V}$ = 50 kJ/(m^3·K)) vs. zděná vápenopísková stavba ($C_{m,V}$ = 80 kJ/(m^3·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.**

Doplňující otázky:

1.1. S ohledem na hlavní otázku stanovit rozdíl mezi dřevostavbami a zděnými stavbami.

Pro toto hodnocení je vhodné srovnávat standardní sendvičovou dřevostavbu s malou měrou vnitřní tepelné akumulace (SDK a OSB desky, anhydrit) a referenční stavbu z keramických dutinových tvárnic (vč. keramického stropu). Tato dřevostavba se u standardní místnosti pro standardní den bez přehřívání (taktéž průměr z celého letního období) bude přehřívat v rámci nejvyšší dosažené teploty $\theta_{ai,max}$ o zhruba 0,5 °C více, než referenční zděná stavba.

1.2. Jaké jsou rozdíly pro konstrukční systémy v otázce 1.1 v období s velmi teplými dny, které trvají zhruba 1 – 3 dny, nebo delší období – cca týden.

Težké konstrukční systémy jsou tepelně stabilnější než systémy lehké. Celé letní období je složeno z mnoha period s vyššími tepelnou zátěží – velmi teplé dny nebo tropické dny. Při začátku několikadenní periody s tepelnou zátěží (např. celkem 7 dní veder) budou oba konstrukční systémy obecně každý den pomalu zvyšovat vnitřní teplotu $\theta_{ai,max}$ až do konce tohoto velmi teplého období (viz část E.5.9). Rozdíly konstrukčních variant v dosažených teplotách $\theta_{ai,max}$ jsou při počátku přehřívání spíše nižší - do 0,5 °C. Na konci období jsou rozdíly spíše vyšší - do 1,0 °C. Na konci velmi teplého období dřevostavba při vychládání zásadně sníží svoji teplotu, naproti tomu zděná těžká stavba bude teplotu udržovat (po 5 dnech). Výsledné dosažené teploty se sobě v tomto období vychládání zhruba rovnají a jsou udržovány po několik dní (cca 2 dny). Pakliže je celé období kratší než výše uvedené (méně než 7 dní), dřevostavba na konci období bude mít nižší rozdílovou teplotu v $\theta_{ai,max}$. Období vychládání se stejnou teplotou dřevostavby a

zděné stavby bude proto ale kratší. Naopak při delším období veder bude konečná rozdílová teplota dřevostavby a zděné stavby vyšší, ale při vychládání budou mít dřevostavba a zděná stavba více dní stejnou teplotu $\theta_{ai,max}$ (průměrné teploty jsou zhruba zachovány).

1.3. V případě, že vliv vnitřní tepelné akumulace je podstatný, jak s tímto faktem postupovat při návrhu stavby.

Bylo prokázáno, že velmi lehké stavby, tzn. např. dřevostavby bez žádné tepelně akumulační hmoty, se již od referenčního zděného keramického systému přehřívají více. Tento rozdíl v teplotách velmi pravděpodobně v malé míře ovlivní pocitový komfort uživatelů uvnitř stavby. Tyto stavební konstrukce by proto v interiéru měli být vybaveny malým, racionálním množstvím tepelně akumulační hmoty. Nejvíce celkovou tepelnou kapacitu místnosti $C_{m,V}$ ovlivňují stěny. Zvýšení tepelné kapacity může proběhnout zdvojením sádrokartonového opláštění stěn, u ekologických staveb například opláštění hliněným panelem. Podlahy je ideální realizovat mokrým procesem (anhydrit nebo beton). Vyzdívky v místnosti taktéž zásadně ovlivňují tepelnou kapacitu místnosti, avšak nejsou to systémové prvky dřevostavby. S malým množstvím akumulačních prvků se dosáhne rozdílu jako v odpovědi 1.1., s větším množstvím pak mohou být dosažené teploty paradoxně nižší než u referenčního zděného keramického systému. Pro efektivní návrh konstrukcí s cílem získat určitou hodnotu měrné tepelné kapacity místnosti $C_{m,V}$ můžou být použity informace z částí této práce F.8, F.9 a F.10.

K 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.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M.. Kvazistacionární a dynamická simulace letního přehřívání pasivní dřevostavby. In: *Budovy a prostředí 2012*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN: 978-80-214-4600- 7.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M., Letní tepelná stabilita a vnitřní akumulační hmota u nízkoenergetických dřevostaveb. In: *Juniorstav 2012 - Sborník anotací*. Juniorstav. Brno, Česká republika: omegadesign, 2012. ISBN: 978-80-214-4393- 8.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M.. Summer Thermal Stability of a Passive House in Moravany - the Czech Republic and Thermal Storage Mass, In enviBUILD 2015. *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. ISBN: 978-80-227-4469- 0.

Ing. Martin Němeček a doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D. *Vnitřní tepelná akumulace pasivních domů a letní tepelná stabilita.* In: TZB-info.cz [online]. 14. 9. 2015. Dostupné z: http://stavba.tzb-info.cz/pasivni-domy/13198-vnitrni-tepelna-akumulace-pasivnich-domu-a-letni-tepelna-stabilita. ISSN 1801-4399.

NĚMEČEK, M.; KALOUSEK, M., *Envelope walls for low-energy and passive wooden buildings*. příspěvek na konferenci Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage, ISBN 978-3-937066-21-9, 2011

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.).

L 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. Třídicí znak: 730563.

4. Superior energy efficiency in buildings. *Passive House Institute.* [Online] Passive House Institute 2015. http://www.passiv.de/en/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm.

5. ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky.* Praha : Český normalizační institut, 1. 10 2011. Třídící znak 730540.

6. TNI 73 0329. *Zjednodušené výpočtové hodnocení a klasifikace obytných budov s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění - Rodinné domy.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.8.2010. Třídící znak: 730329.

7. TNI 73 0330. *Zjednodušené výpočtové hodnocení a klasifikace obytných budov s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění - Bytové domy.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.8.2010. Třídící znak: 730330.

8. Passive House requirements. *Passive House Institute.* [Online] Passive House Institute 2015. http://www.passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm.

9. Ing. Michal Čejka, PORSENNA o.p.s. a Ing. Jan Antonín, Ph.D., EnergySim. Budovy s téměř nulovou spotřebou – porovnání energetických standardů. *TZB-INFO.CZ.* [Online] Topinfo s.r.o., 16. leden 2017. [Citace: 16. leden 2017.] http://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15181-budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-porovnani-energetickych-standardu. ISSN 1801-4399.

10. Schnieders, J., Hermelink, A. CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy Policy.* 2006, 34, stránky 151–171.

11. Schnieders, Jürgen a Feist, Wolfgang. *Für das Passivhaus geeignete Fenster, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 9.* Darmstadt : Passivhaus Institut, 1999. Fachinformation PHI-1999/9.

12. Persson, M.L., Roos, A., Wall, M. Influence of window size on the energy balance of low energy houses. *Energy and Buildings.* 2006, Sv. 38, 3, stránky 181–188.

13. Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Baggio, P. Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings.* 2011, Sv. 43, 3, stránky 1030–1037.

14. *Czech Hydrometeorological Institute,information on http://www.chmi.cz/.*

15. Sylva, Ing. Klímová. *Tepelná technika budov - MODUL 03 - Neustálený teplotní stav.* Brno : VUT v Brně FAST, 01.12.2006.

16. ČSN 73 0540-4. *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody.* Praha : Český normalizační institut, 2005. Třídicí znak: 730540.

17. 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. Třídicí znak: 730318.

18. 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. Třídicí znak: 730320.

19. ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin.* Praha : Český normalizační institut, 1. 11 2005. Třídicí znak: 730540.

21. Blondeau, P., Spérandio, M., Allard, F. Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy.* 1997, Sv. 61, 5, stránky 327-335.

22. Breesch H., Bossaer A., Janssens A. Passive cooling in a low-energy office building. *Solar Energy.* 2005, Vol. 79, 6, pp. 682–696.

23. 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.

24. Pavlov, G.: Olesen, B.W. *Building thermal energy storage – concepts and applications.* Trondheim : 12th ROOMVENT Conference, 2011.

25. ČSN EN 15251. *Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky.* Praha : Český normalizační institut, 1.2.2011. Třídicí znak: 127028.

26. Santamouris M., Asimakopoulos D. *Passive Cooling of Buildings.* London : James & James (Science Publishers) Ltd, 1996. ISBN 978-1-873936-47-4.

27. Givoni, Baruch. *Passive Low Energy Cooling of Buildings.* New York : John Wiley & Sons, 1994. ISBN 9780471284734.

28. Encinas, Felipe. *Probabilistic analysis of passive cooling strategies and occupant behaviour for improving the summer comfort conditions in apartments of the Santiago real estate market.* Louvain : Presses univ. de Louvain, 2012. ISBN 978-2-87558-077-1.

29. Klímová, Ing. Sylva. Vliv obalových konstrukcí na teplotní stav interiérů střešních nástaveb: disertační práce. Brno : VUT v Brně FAST, 2007.

30. KLUBAL, ING. TOMÁŠ. *Disertační práce: Integrace materiálů s fázovou změnou ve stavebních konstrukcích.* 2016.

31. *M. Ostrý, R. Brzoň, T. Klubal. Pasivníchlazení v letnímobdobí s využitímakumulaceteplapřizměněskupenství [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/stavebni-fyzika/8434-pasivni-chlazeni-v-letnim-obdobi-s-vyuzitim-akumulac.*

32. HOFMAN, Bc. PETR. *ANALÝZA LEHKÝCH OBVODOVÝCH PLÁŠŤŮ BUDOV Z HLEDISKA TEPELNÉ STABILITY V LETNÍM OBDOBÍ.* Brno : VUT v Brně, 2014. Diplomová práce.

33. ČUPROVÁ, D. a KLÍMOVÁ, S. *Stínící technika.* Brno : ERA group spol.s r.o., 2006. ISBN 80-7366-046-6.

34. CIHELKA, J. a kol. *Vytápění a větrání.* Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975. ISBN 04-216-75.

35. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* Atlanta : ASHRAE, 2013. ISSN 1041-2336.

36. FANGER, P. O. *Thermal Comfort.* Copenhagen : Danish Technical Press, 1970.

37. CENTNEROVÁ, Ing. Lada. Tepelná pohoda a nepohoda. *Vytápění větrání instalace 5/2000.* [Online] 13. 12 2000. [Citace: 07. 12 2017.] http://vetrani.tzb-info.cz/vnitrni-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda.

38. K. Kabele, Z. Veverková. K. Kabele, Z. Veverková. Modelovánío perativníteploty [online]. 2004 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: WWW: <http://www.tzb-info.cz/1422-modelovani-operativni-teploty>. [Online] 2004. [Citace: 28. 05 2015.] http://www.tzb-info.cz/1422-modelovani-operativni-teploty.

39. Doc. Ing. Jaroslav Řehánek, DrSc. *Tepelná akumulace budov.* Praha : ČKAIT, 2002. ISBN 80-86364-59-3.

40. Schauer, Pavel. *Aplikovaná fyzika, MODUL 4, Přenos tepla.* Brno : VUT v Brně FAST, 2006.

41. Ing. Danuše Čuprová, CSc. *Tepelná technika budov - MODUL 01 - Teoretické základy stavební tepelné techniky - opory.* Brno : VUT v Brně FAST, 2006.

42. *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.*

43. Dincer, I., Dost, S. A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications. *International Journal of Energy Research.* 1996, Sv. 20, 6, stránky 547-557.

44. Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy.* 2012, Sv. 92, stránky 593-605.

45. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C.R., Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009, Sv. 13, 2, stránky 318-345.

46. Khudhair, A.M., Farid, M.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management.* 2004, Sv. 45, 2, stránky 263-275.

47. Tyagi, V.V., Buddhi, D. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2007, Sv. 11, 6, stránky 1146–1166.

48. Němeček, Martin. *Nízkoenergetický bytový dům.* Brno, 2011 : Diplomová práce. VUT v Brně FAST.

49. Davies, Morris G. *Building Heat Transfer.* Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. ISBN 978-0-470-84731-2.

50. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids.* Oxford : Oxford University Press, 1959. ISBN 9780198533030.

51. *P.F. de Almeida Ferreira Tavares, A.M. de Oliveira Gomes Martins, Energy efficient building design using sensitivity analysis—A case study, Energy and Buildings, 39 (2007), pp. 23–31.*

52. ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie.* Praha : Český normalizační institut, 01. 06 2005. Třídicí znak: 730540.

53. ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu.* Praha : Český normalizační institut, 2006. Třídicí znak: 833563.

54. NĚMEČEK, M. a KALOUSEK, M.,. Influence of thermal storage mass on summer thermal stability in a passive wooden house in the Czech Republic. *Energy and Buildings.* 2015, Sv. 107, stránky 68–75.

M Seznam použitých zkratek a symbolů

1.NP	první nadzemní podlaží
2.NP	druhé nadzemní podlaží
CFD	výpočty proudění kapalin (Computational Fluid Dynamics)
CLT	masivní dřevěné panely (Cross Laminated Wood)
CPN	cihla plná nepálená
CPP	cihla plná pálená
ČR	Česká republika
DVD	dřevovláknitá deska nebo izolace
HVAC	TZB systémy vytápění, větrání, chlazení (Heating, Ventilation, Air Conditioning)
LT	letní čas
NZEB	budovy s téměř nulovou spotřebou energie
OJ	obytná jednotka
OSB	dřevoštěpková deska
PCM	materiál akumulující latentní teplo (Phase Change Material)
RD	rodinný dům
SDK	sádrokartonová deska
SVL	sádrovláknitá deska
TV	teplá voda
TZB	technické zařízení budov
V, J, Z, S, JV, JZ, SV, SZ	zkratky světových stran
VC	vápenocementový
VPC	vápenopísková tvárnice
ŽB	železobeton

N Seznam použitých veličin

Označení	Název	Jednotka
E_A	měrná roční potřeba tepla na vytápění	Wh/(m^2·a)
q	hustota tepelného toku	W/m^2
U	součinitel prostupu tepla konstrukce	W/(m^2·K)
U_m	průměrný součinitel prostupu tepla	W/(m^2·K)
U_W	součinitel prostupu tepla okenní výplně	W/(m^2·K)
J_M	intenzita globálního slunečního záření	W/m^2
v	rychlost proudění vzduchu	m/s
φ	relativní vlhkost vzduchu	%
n	výměna vzduchu v místnosti	h^{-1}
θ_e	venkovní teplota vzduchu	°C
θ_{ai}	vnitřní teplota vzduchu	°C
$\theta_{ai,max}$	nejvyšší denní vnitřní teplota vzduchu	°C
$\theta_{l\,max}$	nejvyšší operativní teplota	° C
θ_{rm}	průměrná denní teplota venkovního vzduchu	° C
$\Delta\theta_{V(t)}$	pokles výsledné vnitřní teploty v kritické místnosti	° C
θ_g	teplota kulového teploměru	°C
θ_r	střední radiační teplota	°C
θ_p	povrchová teplota konstrukce	°C
θ_o	operativní teplota	°C
$\theta_{o,max}$	nejvyšší denní vnitřní operativní teplota	°C
ρ	objemová hmotnost	kg/m^3
m	hmotnost	kg
λ	součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
V	objem	m^3
c	měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
c_V	objemová tepelná kapacita	J/(m^3·K)
T	perioda opakování	s
δ	penetrační hloubka	m
ω	úhlová frekvence	rad/s
π	Ludolfovo číslo - konstanta	-
κ	plošná tepelná kapacita konstrukce	J/(m^2·K)
C	tepelná kapacita konstrukce	J/(m^2·K)
C_m	tepelná kapacita místnosti	J/K
$C_{m,V}$	měrná tepelná kapacita místnosti (vztažená na objem místnosti)	J/(m^3·K)
R	tepelný odpor vrstvy nebo konstrukce	m^2·K/W
R_{si}	tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	m^2·K/W
R_{se}	tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	m^2·K/W
g	celková energetická propustnost slunečního záření zasklením (solární faktor)	(-)
Z_{mn}	jednotlivé elementy matice přenosu tepla	