



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN PRAGUE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

POSOUZENÍ VLIVU AKUMULAČNÍ PODLAHY NA TEPELNOU STABILITU MÍSTNOSTI

Impact analysis of floor's heat capacity to thermal stability of a room

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF DLOUHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL ADAMOVSKÝ, Ph.D.

PRAHA 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dlouhý Jméno: Josef Osobní číslo: 459320

Zadávací katedra: 11125

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení vlivu akumulární podlahy na tepelnou stabilitu místnosti

Název diplomové práce anglicky: Impact analysis of floor's heat capacity to thermal stability of a room

Pokyny pro vypracování:

Na základě tepelného modelu místnosti s akumulární podlahou obsahující PCM popište její vliv na tepelnou stabilitu při vytápění. Vytvořte počítačový model, stanovte technické vlastnosti podlahy a klíčové parametry ve vztahu k PCM ověřte. Proveďte validaci počítačového modelu na základě experimentálního modelu. Vyhodnoťte výsledky, popište souvislosti a formulujte závěry.


Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10.10.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

10.10.2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ:

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

V Praze dne 8. 1. 2017

podpis autora:

PODĚKOVÁNÍ:

Za vznik této diplomové práce vděčím především svým nejbližším, bez jejichž podpory by to nešlo.

Dále musím poděkovat svému vedoucímu této práce Ing. Danielu Adamovskému, Ph.D., který mě především pomohl držet správný směr a panu Ing. Pavlu Kopeckému, Ph.D. za jeho neuvěřitelnou trpělivost při mých všetečných otázkách.

Nakonec je důležité poděkovat všem ostatním, jejichž jména zde vypisovat nebudu, ale při čtení v textu svůj díl práce jistě poznají. To se týká především zaměstnanců centra UCEEB v Buštěhradě, ale nejen jich.

OBSAH

ÚVOD	9
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 OSTROVNÍ DŮM	10
1.1.1 MOTIVACE	10
1.1.2 ZDROJE ENERGIE	10
1.1.3 NEZÁVISLOST JAKO POJEM	10
1.1.4 TERMINUS TECHNICUS	10
1.2 AKUMULACE TEPLA A ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA.....	11
1.2.1 AKUMULAČNÍ PODLAHY.....	11
1.2.2 AKUMULACE ENERGIE DO LÁTEK S FÁZOVOU PŘEMĚNOU	12
1.2.3 PŘESTUP TEPLA KONVEKČÍ A SÁLÁNÍM.....	13
1.2.3.1 KONVEKCE (PROUDĚNÍ) H_c – VÝPOČET POMOCÍ KRITERIÁLNÍCH ROVNIC.....	13
1.2.3.2 RADIACE (SÁLÁNÍ) H_s	15
1.3 METODA ELEKTRICKÉ ANALOGIE.....	16
2 METODIKA MĚŘENÍ A PROVEDENÍ	18
2.1 EXPERIMENTÁLNÍ MODEL PODLAHY	18
2.1.1 NÁVRH A ZHOTOVENÍ RECEPTURY BETONOVÉ SMĚSI	18
2.1.1.1 PŘÍPRAVA SMĚSI	18
2.1.1.2 ZPRACOVÁNÍ SMĚSI PRO PRVOTNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ.....	19
2.1.1.3 PŘÍPRAVA SMĚSI PRO VYHOTOVENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU.....	19
2.1.1.4 MĚŘENÍ TEPELNĚ TECHNICKÝCH A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	20
2.1.2 NÁVRH A ZHOTOVENÍ KONSTRUKCE MODELU	21
2.1.2.1 OPTIMALIZACE MODELU.....	21
2.1.2.2 ZHOTOVENÍ MODELU	22
2.1.2.3 UMÍSTĚNÍ A ZPŮSOB MĚŘENÍ MODELU	23
2.1.2.4 KONCEPCE MĚŘENÍ.....	24
2.2 VÝPOČETNÍ MODEL PODLAHY.....	25
2.2.1 POPIS MODELU	25
2.2.1.1 MODEL TEPLOTNÍHO UZLU.....	25
2.2.1.2 ZÁVISLOST MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY NA TEPLOTĚ.....	26
2.2.1.3 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA	27
2.2.2 VALIDACE VÝPOČTOVÉHO MODELU	29
2.2.2.1 VÝPOČETNÍ MODEL PODLAHY	29
2.2.2.2 VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET.....	29
2.2.2.3 CHYBY MĚŘENÍ	30
2.2.2.4 POSOUZENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ MATERIÁLŮ AKUMULAČNÍ VRSTVY.....	31
2.3 MODEL BUDOVY	32
2.3.1 ÚVOD	32
2.3.2 SKLADBY KONSTRUKCÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY VÝPOČTU	32
2.3.2.1 UMÍSTĚNÍ FIKTIVNÍHO MODELU.....	32
2.3.2.2 METEOROLOGICKÁ DATA.....	33
2.3.2.3 KONSTRUKCE BUDOVY	35

2.3.2.1	FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM PRO VYTÁPĚNÍ.....	36
2.3.2.2	POTŘEBA TEPLA NA VYTÁPĚNÍ – ORIENTAČNÍ VÝPOČET.....	37
2.3.3	VÝPOČETNÍ MODEL BUDOVY	39
2.3.3.1	POPIS KONCEPTU MODELŮ BUDOVY A KRITÉRIA VÝBĚRU.....	39
2.3.3.2	POPIS VÝPOČTŮ VYBRANÝCH SYSTÉMŮ MODELU.....	40
2.3.3.3	ZDROJE TEPLA A ZPŮSOBY JEJICH REGULACE.....	42
2.3.3.4	NASTAVENÍ SIMULACE.....	42
2.3.4	ENERGETICKÉ VYHODNOCENÍ PŘÍNOSŮ AKUMULAČNÍ PODLAHY.....	43
2.3.5	TEPLOTNÍ VYHODNOCENÍ PŘÍNOSŮ AKUMULAČNÍ PODLAHY	44
2.3.5.1	TEPLOTA VNITŘNÍHO UZLU – REALITA VS. VÝPOČET	44
2.3.5.2	VYHODNOCENÍ	44
3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	45
3.1	MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ BETONOVÉ SMĚSI	45
3.1.1	MĚŘENÍ PEVNOSTI V TLAKU A TAHU ZA OHYBU.....	45
3.1.2	MĚŘENÍ TEPELNĚ-TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ	48
3.2	MĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU.....	50
3.2.1	EXPERIMENT Č.1 – UVEDENÍ DO USTÁLENÉHO STAVU PŘI ZAPNUTÉ TOPNÉ ROHOŽI	51
3.2.2	EXPERIMENT Č.2 – PROVOZNÍ NATÁPĚNÍ	52
3.3	VALIDACE VÝPOČTOVÉHO MODELU PODLAHY	53
3.3.1	MODEL BEZ LÁTEK S FÁZOVOU PŘEMĚNOU	53
3.3.1.1	SIMULACE BEZ KOREKCE NAMĚŘENÝCH DAT.....	53
3.3.1.2	KOREKCE Č.1 – ÚPRAVA TEPLoty OKOLÍ	54
3.3.1.3	KOREKCE Č.2 – ÚPRAVA OKOLNÍ TEPLoty A PROMĚNNÉHO SOUČINITELE PŘESTUPU A_{Si}	55
3.3.1.4	VÝSLEDNÉ ODCHYLKY MODELU BEZ PCM S REÁLNĚ NAMĚŘENÝMI DATY.....	56
3.3.2	MODEL OBSAHUJÍCÍ LÁTKY S FÁZOVOU PŘEMĚNOU	57
3.3.2.1	SIMULACE S KOREKČÍ NAMĚŘENÝCH DAT BEZ VLIVU PCM	57
3.3.2.2	KOREKCE Č.1 – VLIV TEPLoty TÁNÍ PCM	58
3.3.2.3	VÝSLEDNÉ ODCHYLKY MODELU S PCM OD REÁLNĚ NAMĚŘENÝCH DAT	59
3.3.3	POSOUZENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ PŘI VALIDACI MODELU	61
3.4	VALIDACE VÝPOČTOVÉHO MODELU OBJEKTU	62
3.4.1	POSOUZENÍ ROZDÍLŮ SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA.....	62
3.4.2	POROVNÁNÍ JEDNOUZLOVÉHO A DVOUZLOVÉHO MODELU BUDOVY	63
3.4.3	POSOUZENÍ Z HLEDISKA POTŘEBY TEPLA NA VYTÁPĚNÍ	63
3.5	POTŘEBA TEPLA NA VYTÁPĚNÍ – SIMULACE CELOROČNÍHO PROVOZU	65
3.5.1	VLIV JEDNOTLIVÝCH TEPELNÝCH TOKŮ NA CELKOVOU TEPELNOU BILANCI	65
3.5.2	PODÍL DÍLČÍCH TEPELNÝCH TOKŮ NA TEPELNÉ BILANCI MODELU BUDOVY.....	66
3.5.2.1	AKUMULAČNÍ PODLAHA S BETONEM BEZ PCM	66
3.5.2.2	AKUMULAČNÍ PODLAHA S BETONEM OBSAHUJÍCÍ PCM.....	67
3.5.2.3	POROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH PODLAH Z HLEDISKA POTŘEBNÉHO VÝKONU ZDROJE.....	68
3.5.3	VLIV TLOUŠTKY AKUMULAČNÍ PODLAHY.....	69
3.5.3.1	PODÍL DÍLČÍCH TEPELNÝCH TOKŮ NA TEPELNÉ BILANCI.....	69
3.5.3.2	POROVNÁNÍ POTŘEBY TEPLA NA VYTÁPĚNÍ	70

3.6	TEPELNÁ STABILITA – SIMULACE CELOROČNÍHO PROVOZU	71
3.6.1	VLIV JEDNOTLIVÝCH TEPELNÝCH TOKŮ NA VNITŘNÍ TEPLITU	71
3.6.1.1	PRŮMĚRNÉ MĚSÍČNÍ TEPLITY VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ	71
3.6.1.2	POROVNÁNÍ VLIVU PCM A REFERENČNÍHO BETONU NA MĚSÍČNÍ PRŮMĚRY TEPLIT	72
3.6.1.3	ČETNOST VÝSKYTU TEPLIT INTERIÉRU V ZÓNĚ TEPELNÉ POHODY	73
3.6.1.4	ZIMNÍ OBDOBÍ – TYPICKÝ MĚSÍC ÚNOR	75
3.6.1.5	LETNÍ OBDOBÍ – TYPICKÝ MĚSÍC SRPEN	75
3.6.2	VLIV POUŽITÍ LÁTEK S FÁZOVOU PŘEMĚNOU NA TEPLITU INTERIÉRU	76
3.6.2.1	ČETNOST PŘEKROČENÍ TEPLITNÍHO MAXIMA V ZIMNÍM OBDOBÍ	76
3.6.2.2	PRŮBĚH TEPLIT V ZIMNÍM OBDOBÍ	76
3.6.2.3	ČETNOST PŘEKROČENÍ TEPLITNÍHO MINIMA V LETNÍM OBDOBÍ	77
3.6.2.4	PRŮBĚH TEPLIT V LETNÍM OBDOBÍ	77
3.6.3	VLIV TLOUŠŤKY AKUMULAČNÍ VRSTVY PODLAHY NA TEPLITU INTERIÉRU	78
3.6.3.1	ČETNOST PŘEKROČENÍ TEPLITNÍHO MINIMA V ZIMNÍM OBDOBÍ	78
3.6.3.2	ČETNOST PŘEKROČENÍ TEPLITNÍHO MAXIMA V LETNÍM OBDOBÍ	79
4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	80
4.1	VÝPOČTOVÝ A EXPERIMENTÁLNÍ MODEL PODLAHY	80
4.1.1	VLASTNOSTI BETONOVÉ SMĚSI	80
4.1.1.1	PEVNOST V TLAKU A TAHU	80
4.1.1.2	TEPELNĚ-TECHNICKÉ VLASTNOSTI	80
4.1.2	KOREKCE VÝPOČTOVÉHO MODELU	82
4.1.2.1	MODEL PODLAHY BEZ LÁTEK S FÁZOVOU PŘEMĚNOU	82
4.1.2.2	MODEL PODLAHY S OBSAHEM LÁTEK S FÁZOVOU PŘEMĚNOU	82
4.2	VÝPOČETNÍ MODEL BUDOVY	83
4.2.1	VÝBĚR VHODNÉHO VÝPOČETNÍHO MODELU	83
4.2.2	ZJEDNODUŠENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU	84
4.2.2.1	PŘENOS TEPLA	84
4.2.2.2	Z HLEDISKA PROVOZU BUDOVY	84
4.3	POSOUZENÍ VLIVU AKUMULAČNÍ PODLAHY NA TEPELNOU BILANCI BUDOVY	85
4.3.1	ZIMNÍ PROVOZ – POTŘEBA TEPLA NA VYTÁPĚNÍ	85
4.3.2	LETNÍ PROVOZ – VYHODNOCENÍ TEPELNÉHO CHOVÁNÍ	87
	ZÁVĚR	92
	POUŽITÉ ZDROJE	94
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ	97
	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	98
	PŘÍLOHY	101

ABSTRAKT

Cílem této práce je mimo jiné posouzení reálného využití sluneční energie k soběstačnému vytápění bez dodávek dalších externích konvenčních zdrojů.

Posouzení je provedeno formou simulace vytvořeného jednoduzlového výpočetního modelu moderní dřevostavby. Pro tento účel byl vytvořen experimentální model akumulární podlahy, na kterém bylo zkoumáno její teplotní chování při integraci elektrické topné rohože. Pro zlepšení jejích akumulárních schopností byla také vytvořena vlastní receptura betonu obsahující látky s fázovou přeměnou. Na základě provedených experimentů byla následně provedena validace s výpočetním modelem, a provedeny celoroční simulace ke zhodnocení tepelné stability, potřeby tepla na vytápění a reálné soběstačnosti budovy.

Po vyhodnocení experimentálních měření bylo zjištěno, že využití látek s fázovou přeměnou je sice možné, ovšem množství použitého materiálu je výrazně limitováno klesající pevností vyrobené směsi. I přesto byla pomocí experimentálního modelu provedena měření teplotního chování a na jeho základě provedena kalibrace výpočetního modelu.

Provedením celoročních simulací potřeby energie na vytápění se dospělo k faktu, že při značně zjednodušeném systému řízení a nedostatku slunečního záření v zimním období není možné v posuzovaném objektu udržet vhodné podmínky k trvalému bydlení. Z hlediska tepelné stability se akumulární podlaha projevila jako relativně významný prvek pasivní tepelné ochrany budov v letním období.

PREFACE

The diploma thesis concern on evaluation of solar energy usage for self-sufficient heating, without any supply from external sources.

Assessment is made through simulation with effective capacitance model of modern wooden house. For this purpose was created an experimental model of accumulative floor, which thermal behavior by integration of electric heating mats was examined. For improvement of accumulative capacity was designed special concrete mixture with Phase Change Material (PCM). After measurements on real samples was made a validation between measurement and effective capacitance model. Yearlong simulation for evaluation of heat stability the self-sufficient house was also made.

After main evaluation of experiment results, was found, that usage of PCM's is at one hand possible, but at other hand is quantity of used material limited by decreasing compressive strength of concrete with PCM. Regardless was with use of experimental sample measured heat transfer and on that results validation of computational model was made.

Results of yearlong simulation of demand for heat bring us knowledge, which in case of major simplified control system and insufficient solar radiation in winter period is impossible in examined wooden building hold suitable living conditions. From perspective of heat stability is accumulative floor relatively significant part of passive heat protection of building in summer period.

KLÍČOVÁ SLOVA

Látky s fázovou přeměnou, Akumulace tepla, Matematické modelování, Podlahové vytápění

KEY WORDS

Phase change materials, Heat accumulation, Mathematical modelling, Floor heating

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá myšlenkou soběstačného, avšak dostupného domu, který je schopen poskytnout svému uživateli přiměřený tepelný komfort i v době, kdy z nějakého důvodu nejsou k dispozici zdroje konvenční energie. Za touto myšlenkou stojí zejména fakt, že Evropská unie se již mnoho let pokouší o energetickou soběstačnost na vlastních zdrojích energie, a není tedy důvod, proč nejít této snaze naproti.

Cílem této práce je především posouzení tepelné stability vnitřního prostředí budov, která odpovídá dnešním představám o moderním, ale ekologicky a energeticky šetrném bydlení. Za tímto účelem bude sestaven zjednodušený výpočetní model objektu pracující na základě neustáleného teplotního stavu s tepelnou kapacitou navržené a integrované akumulární podlahy.

Tato podlaha bude zároveň sloužit jako akumulátor pro ukládání tepelné energie vyrobené elektrickou topnou rohoží, napájené z vlastní integrované fotovoltaické elektrárny. S tím souvisí nutnost ověřit teplotní chování takto navržené konstrukce. Za tím účelem bude sestaven experimentální model, kterým bude možné zpětně validovat výpočetní model podlahy, který bude součástí modelu objektu.

Za účelem vylepšení tepelně – technických vlastností akumulární vrstvy podlahy bude také navržena vlastní směs betonu obsahující látky, které jsou schopny za běžných pokojových teplot měnit své skupenství a tím značně zvýšit svou dostupnou tepelnou kapacitu bez změny teploty. Následně bude tato směs otestována a její vlastnosti porovnány s betonem běžného složení.

Na základě měření vzorků betonu a měření teplotního chování experimentálního modelu bude provedena validace výpočtového modelu, na kterém následně budou provedeny celoroční simulace teplotního chování modelovaného objektu.

Cílem simulací bude následně ověřit reálný dopad umístění akumulární podlahy s topnou rohoží do moderní dřevostavby s jinak nízkou tepelnou kapacitou. Bude zkoumán zejména rozdíl v použití běžného betonu a betonu s látkami se změnou skupenství na celkové potřeby energie na vytápění. Z hlediska tepelné stability dále bude zkoumán vliv na letní přehřívání stavby v důsledku vyšších tepelných zisků.

Jako hlavní zdroj informací, bez kterých by tato práce nevznikla, byli zejména výukové materiály pana Ing. Pavla Kopeckého, Ph.D., ve kterých bylo téměř vše podstatné o matematickém modelování vedení tepla a dalších tématech souvisejících se stavební fyzikou. Např. [22] [23].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Ostrovní dům

1.1.1 Motivace

V posledních letech se objevuje mnoho nových technologií, které umožňují snižovat naši energetickou nezávislost i přesto, že náš životní komfort zůstává zachován. Je potřeba tohoto trendu využít v náš prospěch.

Žijeme v době, která je i přes všechna její pozitiva velice náchylná na mnohdy i nepatrnou událost kdekoliv na světě. S přihlédnutím k faktu, že Evropská unie se již několik desítek let snaží zajistit vlastní energetickou soběstačnost na zdrojích energie, technologie k tomu určená velmi pokročila. Je tedy na místě těchto znalostí využít a využít je v náš prospěch.

1.1.2 Zdroje energie

Výroba energie lze rozdělit dle zdroje, ze kterých čerpá na energii z konvenčních zdrojů energie a z alternativních zdrojů energie.

Konvenční zdroje jsou všechny zdroje, které se dnes nazývají jako neobnovitelné a jsou hojně využívány již od dob průmyslové revoluce v 19. století. Jejich čerpáním se výrazně snižuje jejich zásoba na naší planetě, a budoucí generace se již nedočkájí jejich brzkého obnovení.

Naproti tomu alternativní zdroje energie nám nabízejí možnost, jak zachovat zdroje energie i pro budoucí generace. Za tím stojí prostý fakt, že zdrojem této energie je především slunce a gravitace, přičemž tyto zdroje jsou z pohledu lidského života téměř nevyčerpatelné.[33]

1.1.3 Nezávislost jako pojem

Nezávislost na konvenčních zdrojích energie lze z pohledu běžného člověka zajistit zhruba dvěma způsoby.

V prvním případě můžeme opustit všechny výtoky moderního života, pořídit si chalupu uprostřed lesa a žít jako poustevník. Tento způsob života jistě přináší své výhody, ovšem není to řešení, které by souviselo s rozvojem moderních technologií.

Ve druhém případě se jedná o řešení, ve kterém se nesnažíme odbourat vše, co bylo díky mnoha generacím před námi objeveno, ale snažíme se to aplikovat pomocí takových řešení, která zajistí teplo i v době, kdy všechny elektrárny závislé na dodávkách surovin z jiných zemí budou zavřené. A to z jakéhokoliv důvodu.

Je nutné si také uvědomit, že pojem „nezávislost na zdrojích energie“ je jen malá část toho, na čem je dnes lidstvo závislé, a jako takový je nutno ho chápat v kontextu s ostatními potřebami.

1.1.4 Terminus technicus

Tato diplomová práce se primárně zabývá využitím alternativní elektrické energie na vytápění. Je nutno si vysvětlit tedy následující pojmy vztahující se k tématu.

Při výstavbě pozemních staveb naplňujících předpoklady pro jejich nezávislost na konvenčních zdrojích energie (Viz kap.1.1.3.) se používá termínu „Soběstačný dům“ nebo také „Off – grid“ či „Ostrovní dům“. Takový objekt je zcela zbaven přístupu k veřejným sítím jako je veřejná

kanalizace, elektřina, vodovod a další. Všechny výhody jinak plynoucí z užívání veřejných sítí se ale musí vyřešit alternativními způsoby.

V případě běžných staveb, které jsou napojeny na veřejné sítě se používá termín „On – grid“. Zde odpadá zejména starost o to, jak energii vyrobit, kde vzít a upravit pitnou vodu a kam s odpadní vodou. V takové situaci je ovšem uživatel zcela závislý na dodavatelích těchto zdrojů, případně na provozovatelích sítí.

1.2 Akumulace tepla a způsoby přenosu tepla

Ve stavebnictví se dodnes využívá k akumulaci tepelné energie převážně voda, která má vysokou měrnou tepelnou kapacitu ve srovnání s jinými běžně dostupnými látkami. V tomto případě máme relativně snadno dostupnou látku, kterou můžeme použít například pro uskladnění tepelné energie z krbových kamen na pozdější dobu. V případě, kdy chceme ovšem omezit nutný tepelný výkon a zároveň mít zdroj tepla, který není závislý na běžných konvekčních zdrojích energie, je občas nutné šáhnout po jiném způsobu akumulace. V duchu zjednodušení celého systému se proto nabízí možnost ukládat energii přímo do samotné konstrukce budovy bez instalace dalších dodatečných systémů.

1.2.1 Akumulační podlahy

Vlastní návrh podlahových systémů vychází z předpokladu, že prostory, které vytápíme, mají nízkou tepelnou ztrátu. Dle [3] by průměrná roční spotřeba tepla měla být nižší jak 70 – 80kWh/m²rok.

Tento předpoklad je určen spíše pro teplovodní vytápění z běžných konvenčních zdrojů tepla, avšak v případě využití elektrické energie z obnovitelných zdrojů je zřejmé, že tato spotřeba by měla být spíše na úrovni dnešních standardů pasivních domů, tedy do 15kWh/m²rok [3].

Dle [20] mají nízkoenergetické domy tepelné ztráty přibližně do 1W/m³K, u pasivních domů se dostaneme na hodnoty pod 0,7W/m³K. Tyto hodnoty mohou taky sloužit k určité orientaci, zda daný objekt je vhodné vytápět podlahovým vytápěním či nikoliv.

Dalším nutným předpokladem je, abychom teplo akumulované v době slunečního svitu dokázali distribuovat rovnoměrně do interiéru v době největší tepelné ztráty. Tato doba běžně odpovídá zejména nočním hodinám, tj. zhruba od 6 hodin odpoledne do 10 hodin dopoledne dalšího dne.

Podlahové vytápění se dá rozdělit do několika kategorií. Pokud se jedná o využití elektrických topných kabelů, tak zejména dle způsobu uložení odporového drátu a tloušťce jednotlivých vrstev konstrukce.

Rozdělení skladby konstrukce dle funkce

- Přímotopné (Topná rohož umístěna pod nášlapnou vrstvou)
- Smíšené (Vrstva betonové mazaniny do cca 4-6cm)
- Akumulační (Vrstva betonové mazaniny do cca 6-12cm)

Základní požadavky na akumulaci podlahové vytápění

- Nízké tepelné ztráty do zeminy
- Doba odezvy na tepelný tok elektrické rohože
- Relativně malý, ale stabilní tepelný tok do interiéru zejména v době největší tepelné ztráty budovy
- Možnost regulace výkonu topení podlahy (Často obtížně splnitelné), proto je vhodné uvažovat o prediktivních regulacích dle předpovědi počasí
- Povrchová teplota podlahy – splňující dané hygienické limity

1.2.2 Akumulace energie do látek s fázovou přeměnou

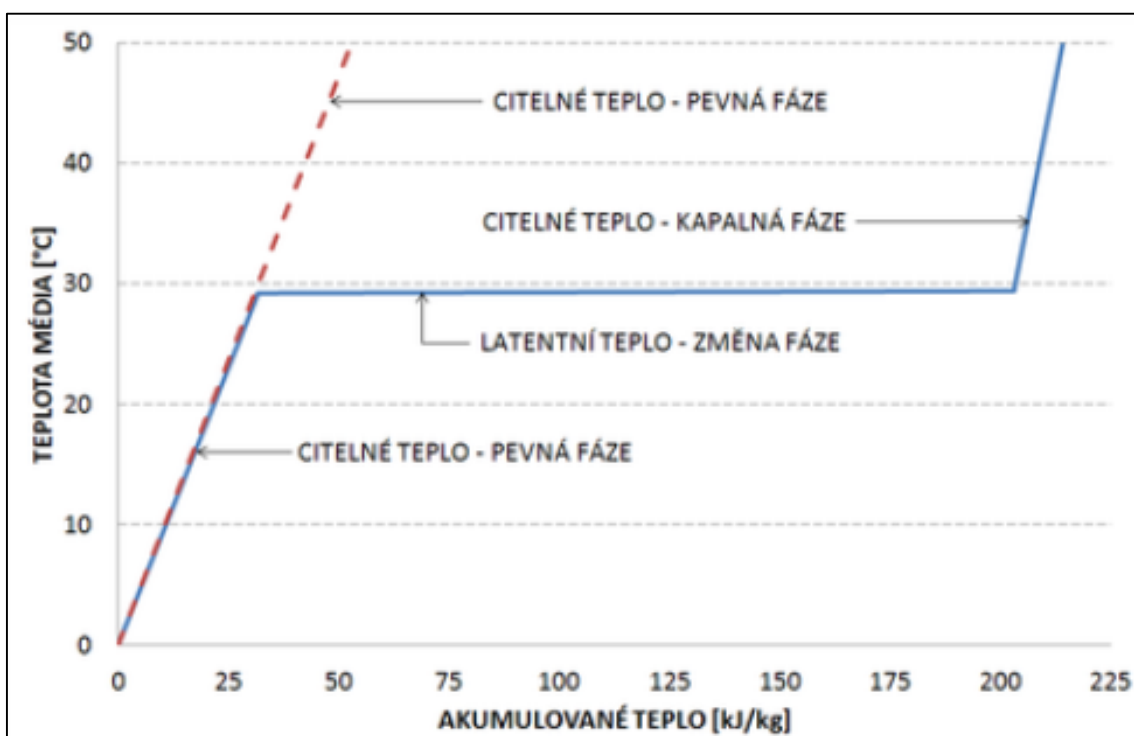
Jak již bylo řečeno, dominantní úlohu dnes v akumulaci tepla zastává voda. S její relativně vysokou tepelnou kapacitou ($4,2\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) a nízkou cenou se jeví na první pohled jako nejlepší volba pro využití ve stavebnictví.

Problémem tohoto média, a také mnoha dalších látek pracujících pouze s citelným teplem, je stoupající teplota látky při navyšování jejich vnitřní tepelné energie. To má za následek také zvýšení tepelného toku do okolí zásobníku, přičemž se neúnosně zvyšuje tloušťka izolací při snaze zachovat nízké tepelné ztráty.

V případě látek využívajících fázové přeměny skupenství (neboli PCM z angl. „Phase change materials“), je tento problém částečně eliminován tím, že místo akumulace citelného tepla využíváme z větší části také teplo latentní, při kterém nedochází k navyšování vnitřní teploty média. Při přeměně energie na latentní teplo dochází k přechodu z jednoho skupenství materiálu do jiného. Použitím těchto látek tedy logicky dochází ke snížení tepelných ztrát do jejich okolí a v některých případech uspořit za množství izolace.

Ve stavební praxi se s PCM nejčastěji setkáme v podobě organických či anorganických sloučenin, přičemž pro implementaci do stavebních konstrukcí se jako nejvhodnější jeví organické parafíny. Tyto vosky mají teplotu tání blízkou teplotě komfortu člověka, tj. od 18°C - 30°C . Tím se zvyšuje jejich potenciál, a je možno je zabudovat při vhodné úpravě do stavebních materiálů v budovách, a tím zvýšit jejich akumulační kapacitu. Schéma principu akumulace latentního tepla je na Obr. 1.1., na kterém je znázorněn průběh akumulace tepla zcela čisté látky s fázovým přechodem.

Ve stavební praxi se využívá nejčastěji směs těchto látek, a fázová přeměna není tedy okamžitá, ale je vždy v určitém intervalu teplot, při kterém postupně tyto látky mění skupenství. [19]



Obr. 1.1. Princip akumulace latentního tepla při fázové změně [19]

1.2.3 Přestup tepla konvekcí a sáláním

Přestup tepla mezi konstrukcí a vnitřním prostředím (vzduchem) je vyvolán prouděním tekutiny (vzduchem) a sáláním k okolním konstrukcím, přičemž následkem je zvýšení teploty okolních povrchů a zvýšení proudění kolem těchto konstrukcí.

Běžně se tyto dva vlivy vyjadřují pomocí jednoho součinitele přestupu tepla h_k , který je součtem součinitelů vyjadřujících vliv konvekce a sálání.

Pro tepelně technické výpočty se ve stavebnictví využívají hodnoty, které odpovídají hodnotám průměrným, vycházejícím z běžné praxe.

Dle normy ČSN 730540-3 [2] jsou tyto hodnoty například:

Tab. 1.1 Součinitele přestupu tepla dle ČSN

Dle ČSN 730540-3			
Povrch	Konstrukce	R (m ² K/W)	h_k (W/m ² K)
Vnější	Zed'	0,04	25,0
Vnitřní	Stěna (tep.tok horizontální)	0,13	7,7
	Střecha (tep.tok vzhůru)	0,1	10,0
	Podlaha (tep. tok dolů)	0,17	5,9

kde $h_k = h_c + h_s$

Tyto hodnoty jsou dostatečné pro běžné tepelně technické výpočty, ovšem při výpočtu průběhu teplot v neustáleném stavu, kdy se teploty povrchu a okolí výrazně liší (cca 5-15K v případě podlahového vytápění), může docházet k výraznému ovlivnění výsledného tepelného toku z konstrukce a do konstrukce.

1.2.3.1 Konvekce (proudění) h_c – výpočet pomocí kritériálních rovnic

V takovém případě je nutno začlenit do výpočetního modelu závislost součinitele přestupu tepla závislého na teplotě. Pro výpočty přestupu tepla konvekcí se s výhodou využívají kritériální rovnice založené na výpočtech s bezrozměrnými podobnostními čísly. Literatura např. [9],[10],[11]

Pro aplikaci na podlahové vytápění se dá využít výpočtu volného proudění do neomezeného prostoru například dle postupu M.A. Michejeva [9]. Jedná se o výpočet součinitele přestupu tepla h_c (α_c) z Nusseltova čísla dle rovnice:

$$Nu = \frac{h_c l}{\lambda} \quad [-]$$

Součinitel h_c se z rovnice vyjádří po dosazení všech ostatních vypočtených hodnot. Nusseltovo číslo se vypočítá z následující rovnice:

$$Nu = C(GrPr)^n \quad [-]$$

Kde:

- h_c = Součinitel přestupu tepla konvekcí (W/m²K)
- l = charakteristický rozměr povrchu (m)
- λ = tepelná vodivost vzduchu (W/mK)
- C a n = empirické konstanty dle tab.č.
- Gr = Grashofovo kritérium
- Pr = Prandtlovo kritérium

Pro výpočet Nusseltova čísla je nutno dosadit konstanty z Tab. 1.2., které se získají ze řádku odpovídající součinu Grashofova a Prandtlva čísla v daném intervalu.

Tab. 1.2 Konstanty pro výpočet kritériálních rovnic

$GrPr$	C	n	chyba %
$<10^{-2}$	0,5	0	± 15
$1 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	$\pm 15^*$
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	± 15
$2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	± 8

Grashofovo kritérium

Toto číslo udává poměr mezi vztlakem a viskózními silami kapaliny. Rovnice:

$$Gr = \frac{\beta \Delta t g l^3}{\nu^2} \quad [-]$$

Kde:

β = teplotní objemová roztažnost (K^{-1})

Δt = rozdíl teplot těsně u povrchu a v dostatečné vzdálenosti od povrchu

g = tíhové zrychlení země (m/s)

ν = kinematická viskozita kapaliny (m²/s)

Prandtlovo kritérium

Toto číslo udává vlastnosti tekutiny při sdílení hybnosti a tepla, v případě volného proudění bez vlivu okolí lze zapsat jako:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad [-]$$

Kde:

a = součinitel teplotní vodivosti (m²/s)

ν = kinematická viskozita kapaliny (m²/s)

Požadované hodnoty fyzikálních veličin je možné dohledat v různých tabulkách pro vlastnosti vzduchu, například zde [12]. Je ovšem nutné vždy odečíst hodnoty příslušné dané teplotě vzduchu. V případě aplikace na konstrukci podlahového vytápění je vhodné vybírat v teplotním rozmezí 18 – 25°C jako běžná teplota vzduchu v objektech určených pro bydlení.

1.2.3.2 Radiace (sálání) h_s

Druhou složkou nutnou pro správné stanovení součinitele přestupu tepla je stanovení vlivu teploty okolí na změnu sálavého tepelného toku z konstrukce, a tedy odpovídajícího součinitele přestupu tepla sáláním h_s .

V běžných tepelně technických výpočtech lze uvažovat s hodnotou $h_s = 4,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, která odpovídá přibližně běžné výměně tepla sáláním mezi běžnými stavebními konstrukcemi při rozdílu teplot mezi konstrukce 1-2K. [5]

Pro výpočet sdílení tepla sáláním v závislosti na teplotě povrchu a okolí lze využít rovnice pro výpočet h_s vycházející z obecné rovnice pro výměnu tepla sáláním mezi nekonečnými rovnoběžnými plochami.

$$h_s = \frac{\sigma \varepsilon_{1,2} F_{1,2} (T_1^4 - T_2^4)}{\theta_1 - \theta_2} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Kde:

σ = Stefan-Boltzmanova konstanta ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

ε = Emisivita povrchů (-)

F = Úhlový součinitel sálání (pro uzavřený systém lze $F=1$) (-)

T = Termodynamická teplota povrchů (K)

θ = Teplota povrchů podlahy a okolních konstrukcí ($^\circ\text{C}$)

Přičemž pokud se liší hodnoty emisivity okolí a vlastní konstrukce podlahy, lze hodnotu vzájemné emisivity vypočítat pomocí rovnice:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [-]$$

Kde:

ε_1 = Emisivita povrchu podlahy

ε_2 = Průměrná emisivita okolních konstrukcí

1.3 Metoda elektrické analogie

Pro řešení modelů s přenosem různých druhů energií je výhodné využít metody, která je založena na podobnosti s přenosem elektrického proudu. V obou případech máme rozdíl potenciálů a mezi nimi vložený odpor, který určuje velikost tepelného toku energie, respektive velikost proudu protékající vodičem v případě elektrické energie. Literatura např. [22]

Tato metoda vychází z rovnice vedení tepla dle Fouriera.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Která nám popisuje změnu teploty v čase v závislosti na tepelném toku do materiálu o daných vlastnostech. Vztah mezi touto rovnicí a rovnicí kontinuity, ze které dále vycházíme pro potřeby numerického řešení je uveden například v [22]

Výpočetní model - teorie

Základním prvkem modelu jsou uzly, které obsahují buď neznámou měřenou veličinu (teplota, vlhkost...) nebo určují již konkrétní veličinu v daném bodě za daných okrajových podmínek. Tyto uzly mohou mít též schopnost akumulace energie. Více na [22]. Pro potřeby této DP je výpočet uzlů řešen jako jednorozměrného šíření tepla.

Akumulace energie do těchto uzlů vychází z již zmíněného zákona zachování energie (rovnice kontinuity).

V případě uzlu bez akumulace můžeme napsat, že:

$$q_{in} - q_{out} = 0$$

Ovšem v případě, kdy uzel má akumulační schopnost Q (J/m^2) dostáváme již rovnici:

$$\frac{dQ_i}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad [W/m^2]$$

$$dQ_i = \rho c \Delta x T \quad [J/m^2]$$

$$\rho c \Delta x = C \quad [J/m^2 K]$$

Kde:

Q_i = tepelná kapacita uzlu (plošná) (J/m^2)

t = časový krok výpočtu (s)

$q_{in,out}$ = hustota tepelného toku (W/m^2)

ρ = objemová hmotnost (kg/m^3)

c = měrná tepelná kapacita (J/kgK)

Δx = výška uzlu (m)

C = tepelná kapacita ($J/m^2 K$)

Rozdíl mezi hustotou tepelného toku q_{in} a q_{out} vyjadřuje množství uložené „tepelné“ energie. Z toho také vyplývá, že čím menší máme tepelnou kapacitu C (J/K), tím větší rozdíl teplot za stejný čas v daném prostředí zaznameneáme.

Hustota tepelného toku q nám udává množství energie, které do uzlu vstupuje a vystupuje. Je dána podílem teplotního gradientu a tepelného odporu prostředí.

$$q_{in} = \frac{T_{i-1} - T_i}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad q_{out} = \frac{T_i - T_{i+1}}{\frac{\Delta x}{\lambda}} \quad [W/m^2]$$

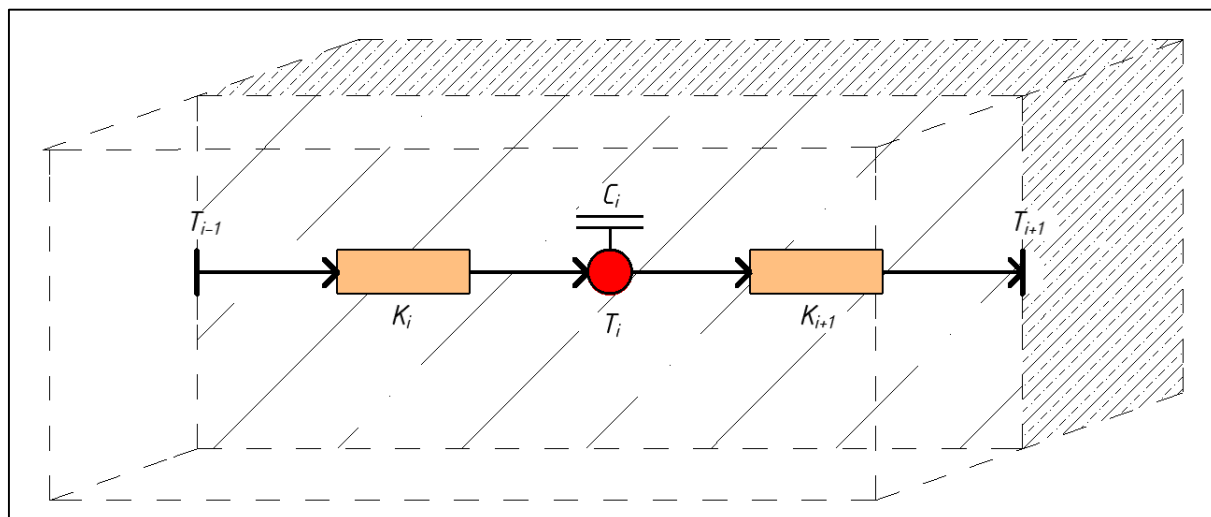
Po dosazení a úpravě rovnic dostáváme rovnici sloužící jako předpis při řešení numerického modelu

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = K_i(T_{i-1} - T_i) - K_{i+1}(T_i - T_{i+1})$$

Kde:

$$K = \frac{\lambda}{\Delta x} \quad (W/m^2K)$$

Na Obr. 1.2 je ukázka jednuzlového modelu např. homogenní stěny. Okrajové teploty mohou být zadány přímo nebo rozšířeny o další uzel teploty vzduchu uvažujíc přestup tepla na povrchu.



Obr. 1.2 Schéma jednuzlového modelu

2 METODIKA MĚŘENÍ A PROVEDENÍ

2.1 Experimentální model podlahy

Důležitou součástí této diplomové práce je ověření funkčnosti akumulační podlahy při vytápění. Z toho vyplývá nutnost sestavit funkční výpočetní model, který bude založený na výsledcích, která vyplívají z experimentálního měření. Za tímto účelem byla navržena vlastní receptura betonové směsi, která byla dále využita při realizaci experimentálního modelu akumulační podlahy.

2.1.1 Návrh a zhotovení receptury betonové směsi

2.1.1.1 Příprava směsi

Pro správné ověření vlastností modelu akumulační podlahy bylo potřeba stanovit reálné fyzikální vlastnosti samotné betonové směsi. Vzhledem k tomu, že normové hodnoty pro betony hutné či železobetonové se od reality mohou značně lišit a vlastnosti betonů s PCM nejsou obsaženy v běžných normových hodnotách, bylo potřeba vytvořit vlastní testovací vzorky. V běžné praxi je vývoj vhodné receptury náročný proces, který vyžaduje mnoho rozličných měření a úprav vycházejících z předchozích pokusů. V rámci této práce bylo nutné vytvořit za relativně krátký čas dostatečně stabilní směs betonu, která poslouží jako vhodný materiál pro ověření a následnou validaci výpočtového modelu.

První fází bylo zvolit vhodný poměr základních složek směsi a počet testovacích vzorků. Pro namíchání obyčejné směsi betonu bez PCM lze vycházet ze standardních postupů, které jsou doporučeny například v lit.[14]. Zde jsou uvedeny pro různé druhy betonových směsí poměry vodních součinitelů, druhy kameniva a jejich kombinace a doporučené přísady do betonu.

V rámci přípravy byl vytvořen návrh směsi, který se snažil zohlednit požadavky na běžné akumulační podlahy. Tj. požadavek na vhodné tepelně technické a mechanické vlastnosti. Dále bylo potřeba ověřit vlastnosti betonů s přidaným PCM, přičemž bylo použito výrobku Micronal DS 5008 (Tab. 2.1) od firmy BASF [25]. V první fázi testování byli vytvořeny 4 vzorky, a to jeden referenční vzorek a 3 vzorky s různým obsahem PCM látek.

Tab. 2.1 Vlastnosti látek s fázovou přeměnou – Micronal DS

Výrobek BASF	Forma	Bod tání	Celková tep. kapacita*	Latentní tep. kapacita*	Průměrná obj. hmotnost
Micronal DS 5001	Prášek	26°C	145Kj/kg	110Kj/kg	250kg/m ³ - 350kg/m ³
Micronal DS 5008	Prášek	23°C	135kj/kg	100kJ/kg	250kg/m ³ - 350kg/m ³
Micronal DS 5029	Prášek	21°C	125kj/kg	90kJ/kg	250kg/m ³ - 350kg/m ³

* Během tání a tuhnutí látky

2.1.1.2 Zpracování směsi pro prvotní ověření vlastností

Míchání směsí v první fázi proběhlo v laboratořích na UCEEB v Buštěhradě.

Pro vlastní testování bylo namícháno celkem čtyři druhy směsí, každá po 3 zkušební trácce 300x100x100mm (litinová forma na zkušební trámce) pro ověření mechanických vlastností a jedna forma 300x300x60mm (z dřevěného bednění) určená pro ověření tepelně technických vlastností. (Viz. Obr. 2.1)

V Tab. 2.2 je uvedeno složení jednotlivých směsí, které bylo použito pro namíchání testovacích vzorků.

Tab. 2.2 Poměry jednotlivých složek určených pro testovací vzorky

Druh	Referenční varianta			2%			3%			4%		
	Množství (kg)	Hm. podíl	Obj. podíl	Množství (kg)	Hm. podíl	Obj. podíl	Množství (kg)	Hm. podíl	Obj. podíl	Množství (kg)	Hm. podíl	Obj. podíl
Cement 42,5 CEM I	6	13,6%	15%	5,2	13,2%	13%	5,2	13,0%	13%	5,2	12,7%	12%
Záměsová voda	3,75	8,5%	12%	3,7	9,4%	13%	3,95	9,8%	13%	4,2	10,3%	13%
Kamenivo fr. 0-4	24,3	55,1%	50%	21	53,2%	45%	21	52,3%	43%	21	51,5%	42%
Kamenivo fr. 4-8	10	22,7%	23%	8,7	22,0%	21%	8,7	21,7%	20%	8,7	21,3%	19%
Plastifikátor	0,06	0,1%	0%	0,083	0,2%	0%	0,087	0,2%	0%	0,107	0,3%	0%
PCM	0	0,0%	0%	0,8	2,0%	7%	1,21	3,0%	10%	1,6	3,9%	13%
Póry	0	0,0%	0%	0	0,0%	0%	0	0,0%	0%	0	0,0%	0%
Celkem	44,11 Kg			39,483 Kg			40,147 Kg			40,807 Kg		
Vodní součinitel	0,63			0,71			0,76			0,81		
Sednutí kužele	11cm/11cm			11cm/10,8cm			11,2cm/11,5cm			11cm/10,8cm		

V těchto shrnutích je možno upozornit, že se zvyšujícím se podílem jemných částic PCM je také nutno zvyšovat vodní součinitel tak, abychom docílili plastické konzistence vhodné pro podlahové konstrukce. Pro otestování a porovnání konzistence čerstvé směsi byla provedena zkouška sednutí kužele, přičemž bylo využito malého střešacího stolku určeného převážně pro malty. Viz. Obr. 2.1 (vzhledem k omezeným možnostem laboratoře nebyl dostupný běžný střešací stůl na betonu).

Na Obr. 2.1. kompletní soubor zkušebních tráců (100x100x300) a dlaždic (300x300x60).



Obr. 2.1 Příprava zkušebních vzorků pro ověření vlastností aku. betonu

2.1.1.3 Příprava směsi pro vyhotovení experimentálního modelu

Pro zhotovení experimentálního modelu byla vytvořena další skupina testovacích vzorků referenčního betonu a betonu s 4% hmotnostním podílem látek s PCM. Byl zvolen stejný poměr jednotlivých složek betonové směsi. Zásadní rozdíl spočíval pouze ve změně míchacího zařízení, kdy byla použita místo spádové míchačky míchačka horizontální nacházející se v Experimentálním centru na fakultě stavební.

2.1.1.4 Měření tepelně technických a mechanických vlastností

Pro ověření tepelné vodivosti a tepelné kapacity zkušebních vzorků bylo vyhotoveno bednění 300x300x60mm (vnitřní rozměr) z bednicích desek. Tyto formy byly vytvořeny za účelem provedení měření ve stacionárním měřicím přístroji HFM 300, který je schopný ze zadaných okrajových teplot a ustáleného tepelného toku dopočítat tepelnou vodivost daného materiálu.

Pro ověření těchto vlastností byl dále použit přenosný měřicí přístroj Isomet 2104, který umožňuje relativně rychle a jednoduše měřit vlastnosti různorodých materiálů pomocí příložené povrchové sondy. Dále je schopný měřit tepelnou kapacitu, která je též důležitým parametrem nutný pro další výpočty.

Pro ověření mechanických vlastností byly vyhotoveny zkušební trámce 100x100x300mm v ocelových formách, tyto trámce byly určeny pro měření pevnosti v tahu za ohybu a dále pevnosti v tlaku. Ověření těchto pevností bylo provedeno na zkušebních lisech v Experimentálním centru na fakultě stavební v Praze. Nejdříve byla provedena zkouška pevnosti v tahu (tříbodová), přičemž na vzniklých dvou vzorcích zlomeného zkušebního trámce byla provedena zkouška pevnosti v tlaku. Měření byla provedena dle [7].

Určení objemové hmotnosti vzorků bylo provedeno na všech zkušebních vzorcích před jejich vlastním testováním.

2.1.2 Návrh a zhotovení konstrukce modelu

Pro validaci výpočtového modelu v programu Matlab [35] je nutno ověřit, zda tento model vykazuje výsledky srovnatelné s modelem reálným. Pro validaci modelu bylo nutné zhotovit dva experimentální modely – akumulční podlaha s obyčejným betonem (dále referenční) a s betonem obsahující látky s fázovou přeměnou (dále PCM).

Model bylo dále potřeba vymyslet tak, aby ho bylo možné přenášet nejen mezi místnostmi, ale také mezi budovami, tudíž bylo potřeba, aby měl odpovídající rozměry a hmotnost.

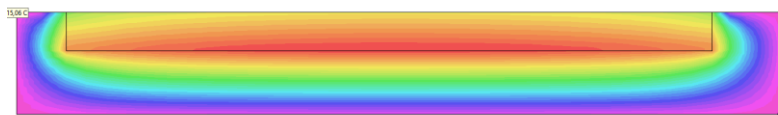
2.1.2.1 Optimalizace modelu

Šířka modelu byla zvolena s ohledem na rovnoměrné rozložení teplot uprostřed modelu, kde bude probíhat měření. Kontrola byla provedena pomocí programu Area 2015 [37], ve které byl vypočten ustálený teplotní stav modelu při předpokládaných okrajových podmínkách samotného testu modelu, bylo provedeno posouzení vlivu tloušťky izolace a šířky modelu, na jehož základě byl vybrán nejvhodnější rozměr modelu.

Zároveň zde proběhla kontrola funkčnosti výpočtového modelu v ustáleném stavu s výsledky z ověřeného výpočtového programu Area. Posouzení změn konstrukce na teploty v ustáleném stavu při zapnuté topné rohoži v Tab. 2.3. Ukázka rozložení teplot při ustáleném stavu modelu na Obr. 2.2.

Tab. 2.3 Ověření teploty v ustáleném stavu exp. modelu

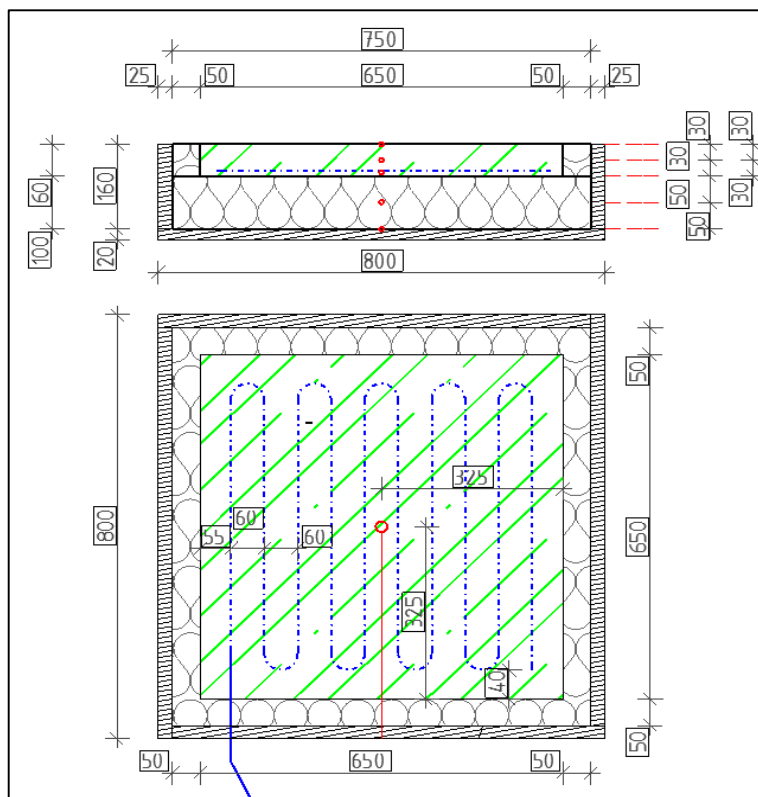
Šířka betonu	Izolace krajní	Teplota povrchu	Teplota - topná rohož
550mm	50mm	20,58	22,4
550mm	60mm	20,6	22,42
550mm	70mm	20,6	22,42
600mm	60mm	20,63	22,45
600mm	50mm	20,61	22,43
600mm	70mm	20,63	22,45
650mm	50mm	20,64	22,47
650mm	60mm	20,65	22,48
Matlab		20,7	22,55



Obr. 2.2 Rozložení teplot při ustáleném stavu v exp. modelu – Area 2015 [37]

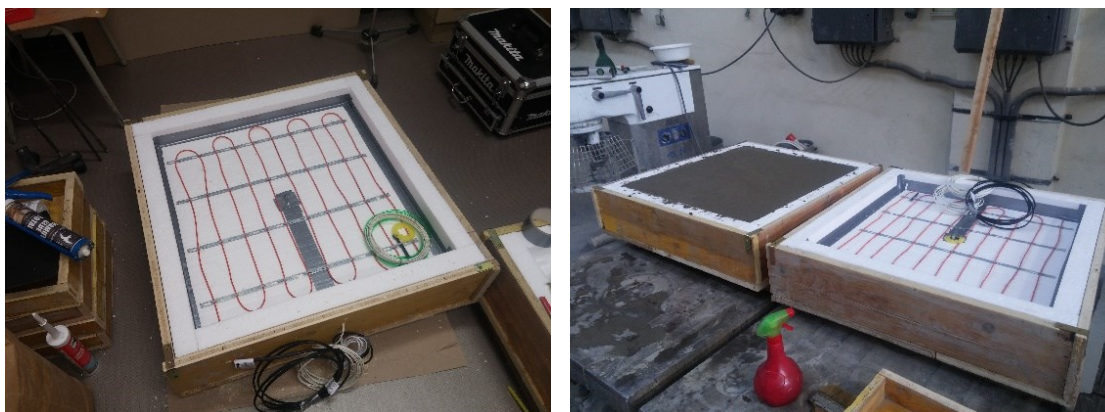
2.1.2.2 Zhotovení modelu

Pro konstrukci modelu je využita dřevěného bednění o rozměrech 750x750x160mm, do které je umístěn ve dvou vrstvách podlahový polystyren EPS 70F o tloušťce dvakrát 50mm, dále je z tohoto izolantu vytvořen rám výšky 60mm pro omezení tepelného toku do bočních stran, který zároveň slouží jako bednění betonové směsi.



Obr. 2.3 Výrobní schéma experimentálního modelu vč. umístění měřících čidel

Do takto připraveného modelu byli v průběhu montáže osazeny 4 teplotní čidla typu Dallas DS18B2 [27], která budou sloužit pro záznam průběhu teplot v průběhu natápění pomocí vloženého topného okruhu z elektrického topného kabelu o výkonu 10W/m délky 6,6m [26]. Tento kabel je připevněn pomocí ocelového pásku s ohebnými přichytkami, který je nalepen pomocí lepidla na polystyrenovou desku tvořící dno akumulární vrstvy. Schéma umístění jednotlivých čidel a topné rohože je znázorněn na Obr. 2.3.



Obr. 2.4 Ukázka z přípravy experimentálního modelu – topný kabel a betonáž

Po osazení všech komponent modelu proběhlo vybetonování akumulární vrstvy z betonu. Poměry jednotlivých komponent byli voleny na základě výsledků z přípravy zkušebních vzorků na měření vlastností v Tab. 2.2. Samotná příprava směsi byla provedena v Experimentálním centru na stavební fakultě. Míchání směsi proběhlo v horizontální míchače, která zde byla k dispozici.

Spolu s akumulární vrstvou modelu bylo provedeno vybetonování zkušebních trámců na měření pevnostních parametrů a dlaždice pro měření tepelně technických vlastností, tedy stejný postup jako v případě prvního testování uvedeného v kap. 2.1.1. V Tab. 2.4 je uvedeno potřebné množství směsi pro zhotovení jednoho modelu a souvisejících přípravků.

Tab. 2.4 Složení receptury u vzorků č.2 a potřebný objem směsi

Směs - Referenční			
Druh	Hmotnost složek	Hm. zastoupení	Objemové zastoupení
	Kg	%	%
Cement 42,5 CEM I	12,90	13,6%	15%
Záměsová voda	8,06	8,5%	12%
Kamenivo fr. 0-4	52,25	55,1%	50%
Kamenivo fr. 4-8	21,50	22,7%	23%
Plastifikátor	0,129	0,1%	0%
PCM	0,00	0,0%	0%
	94,8 kg		

Směs - 4% PCM			
Druh	Hmotnost složek	Hm. zastoupení	Objemové zastoupení
Cement 42,5 CEM I	12,90	12,7%	12%
Záměsová voda	10,42	10,3%	13%
Kamenivo fr. 0-4	52,08	51,5%	42%
Kamenivo fr. 4-8	21,58	21,3%	19%
Plastifikátor	0,27	0,3%	0%
PCM	3,97	3,9%	13%
	101,2 kg		

Zkušební trámec	
Počet kusů	3
Délka	0,4 m
Šířka	0,1 m
výška	0,1 m
Objem	0,004 m ³

Dlaždice	
Počet kusů	1
délka	0,3 m
šířka	0,3 m
výška	0,06 m
Objem	0,0054 m ³

Experiment - podlaha	
Počet kusů	1
délka/šířka ^2	0,65 m
výška	0,06 m
Objem	0,02535 m ³

Objem varianty **0,04275** m³

2.1.2.3 Umístění a způsob měření modelu

Během přípravy byl model osazen čidly [27] a topnou rohoží [26], přičemž byl model umístěn v relativně stabilním prostředí v hale na UCEEB, kde se teplota drží kolem 17°C. Umístění modelu nebylo vybráno náhodně. Bylo potřeba držet teplotu prostředí několik stupňů pod teplotou předpokládaného tání parafínů obsažených v modelu č.2 (s PCM) tak, aby při náběhu topné rohože bylo možné zaznamenat vliv těchto látek při jejich tavení pomocí zabudovaných teplotních čidel.

Před vlastním měřením byla čidla modelu napojena na 1-Wire sběrnici napojená na modul PLC SDS Micro, Din E R2 [29], přes kterou byla aktivně odesílána měřená data pomocí UDP protokolu do databáze webového serveru, ze kterého je dále možno online pomocí vytvořených webových stránek data zobrazovat a exportovat v textovém formátu. Více o použitém řešení v [16]

Dále byla měřena teplota v prostoru haly. Topný kabel byl pro účely experimentu napojen na zdroj elektrické energie o napětí 230V. Pro kontrolu aktuálního příkonu topné rohože byl napojen přes wattmetr Voltcraft energy logger 4000 [30], u kterého byla prováděná průběžná vizuální kontrola aktuálního příkonu.

2.1.2.4 Koncepce měření

Před vlastním měřením byla provedena předběžná simulace, která posloužila k vlastnímu sestavení harmonogramu měření. Jednotlivé testy byli naplánovány tak, aby bylo možné následně porovnat výsledky těchto měření s výsledky simulací provedené se stejnými okrajovými podmínkami, na jejichž základě dále bude posuzována přesnost výpočtového modelu.

Plán měření byl následující:

1. Měření z ustáleného stavu okolí do ustáleného stavu se zapnutou topnou rohoží a následné chladnutí.
2. Krátký cyklus natápění odpovídající přibližně reálnému provozu (cca 5h slunečního svitu denně v zimním období)

Experiment č.1

Uvedením modelu do ustáleného stavu lze nejnázne posoudit správnost měření tepelné vodivosti jednotlivých vrstev. Nevýhodou tohoto měření je ovšem časová náročnost, kdy je potřeba model uvést do ustáleného stavu při zapnutí topné rohoží a poté nechat zpět vychladnout do teploty okolí.

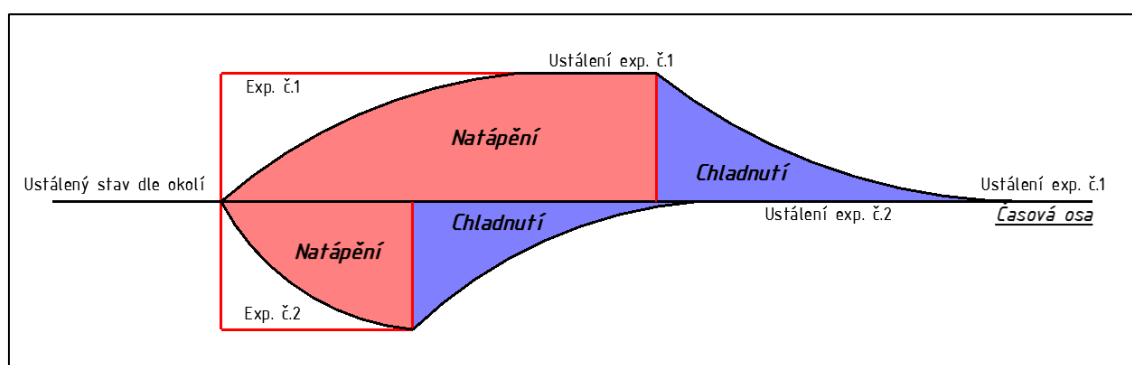
Dále lze tímto měřením zaznamenat vliv látek s fázovou přeměnou na počáteční náběh a změnu sklonu křivky teplot v jednotlivých vrstvách.

Z výsledného rozdílu maximálních teplot v ustáleném stavu lze dále přibližně odvodit rozdíl v tepelných vodivostech betonu obou modelů a tím zpětně zkontrolovat správnost měření.

Experiment č.2

Simulací odpovídající předpokládanému reálnému provozu v budově je možné porovnat maximální teploty v jednotlivých vrstvách po krátkém časovém úseku předtím, než model dosáhne ustáleného stavu.

Touto simulací je také možné ověřit funkčnost výpočtového modelu při okamžité změně ze stavu natápění do stavu chladnutí akumulční hmoty. Tím získáme lepší představu o fungování při krátkých dynamických cyklech, které se v reálném provozu budou vyskytovat.



Obr. 2.5 Schéma průběhu experimentálního měření aku. podlahy

2.2 Výpočetní model podlahy

2.2.1 Popis modelu

V této kapitole budou popsány nejdůležitější součásti výpočtového modelu, který byl vytvořen v programu Matlab (odkaz). Tento model je založen na principu metody elektrické analogie popsané v kapitole 1.3. S výhodou je zde využita grafická nástavba Simulink, která umožňuje intuitivně vytvářet matematické operace pomocí zástupných bloků a jejich vzájemné propojení.

2.2.1.1 Model teplotního uzlu

Pro účely posouzení vlivu akumulační podlahy byl vytvořen víceuzlový model podlahy s vlastními tepelnými kapacitami a dále okrajovými uzly, které simulují povrchové teploty v závislosti na součinitelu přestupu tepla.

Základní řídicí rovnice vycházející ze zákona zachování energie je převedena na jednotlivé funkční bloky zastupující jednotlivé členy rovnice a algebraické operace mezi nimi.

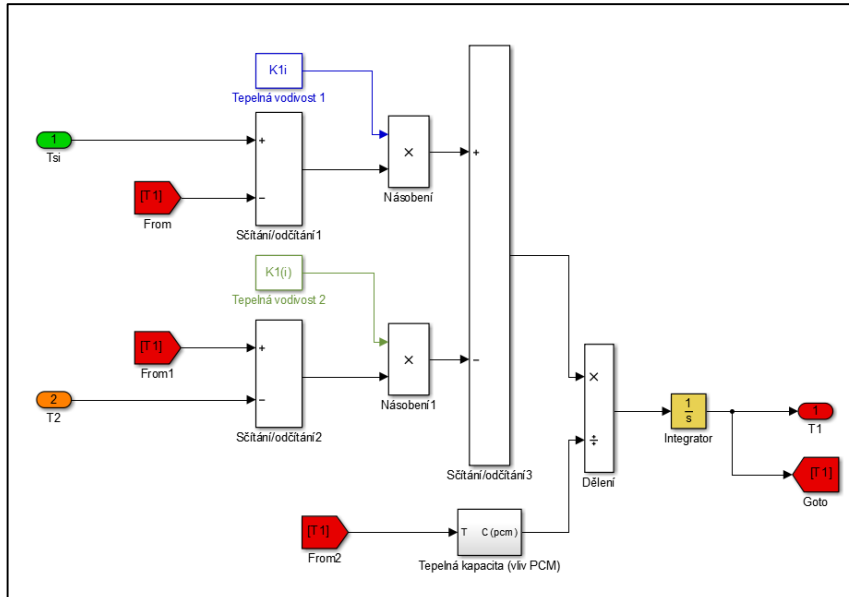
Řídicí rovnice vedení tepla – matematický zápis obecný:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = K_i(T_{i-1} - T_i) - K_{i+1}(T_i - T_{i+1})$$

Řídicí rovnice vedení tepla – matematický zápis upravený pro potřeby modelu:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{K_{1i}(T_{si} - T_1) - K_{i(i)}(T_1 - T_2)}{C_{pcm}}$$

A přepis do grafické podoby v Simulinku:



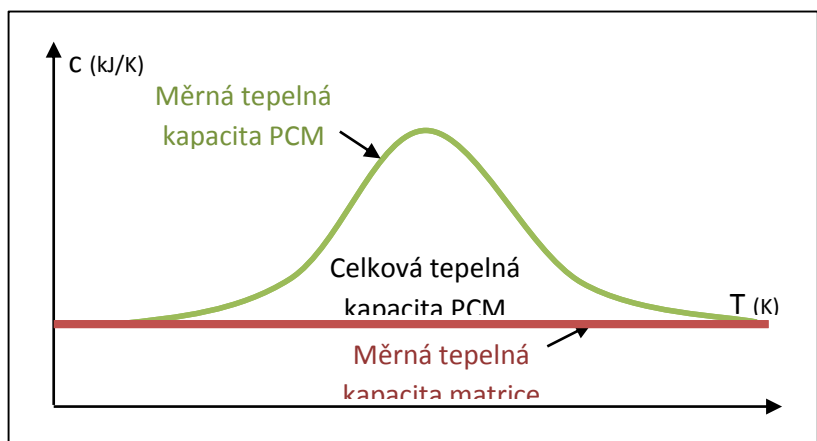
Jednotlivé bloky se sdružují dále do subsystémů, které jsou vždy určeny k výpočtu právě jednoho teplotního uzlu.

Každý teplotní uzel je vždy definován tepelnou kapacitou, tepelnou vodivostí a objemovou hmotností, přičemž tato tepelná kapacita není závislá na teplotě vyjma případu uzlů akumulační vrstvy, ve které se nachází látky s fázovou přeměnou. Tato problematika je obecně popsána v kapitole 1.2 a princip modelu v následující podkapitole.

2.2.1.2 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě

V případě teplotních uzlů zastupujících akumulární vrstvu s přidanými látkami s fázovou přeměnou bylo nutno uvažovat s proměnou tepelnou kapacitou. V ostatních teplotních uzlech je uvažováno s konstantní hodnotou měrné tepelné kapacity.

Vzhledem k tomu, že změna měrné tepelné kapacity PCM je závislá na fyzikální přeměně skupenského stavu této látky, nedochází ke změně v jednom bodě dané teploty tání, jako je zobrazeno na Obr. 2.6. Průběh je značně ovlivněn nehomogenitou použité látky, kdy k přeměně dochází v určitém rozmezí teplot. Na Obr. 2.6. je schématický zelenou křivkou zobrazena oblast tání, kdy dochází ke zvyšování měrné tepelné kapacity vlivem přeměny obsažených parafinů ze stavu pevného do stavu kapalného. Po jejich plném roztavení daný materiál zvyšuje svou teplotu již pouze v závislosti na jeho běžné měrné tepelné kapacitě, přičemž ta je zobrazena červenou vodorovnou čarou.



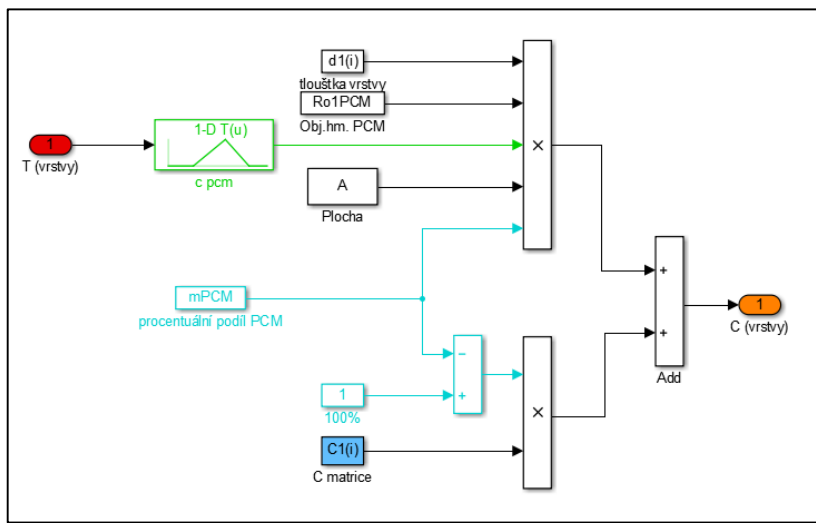
Obr. 2.6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě u látek PCM

Výpočet tepelné kapacity je pro účely tohoto modelu znázorněn v následující rovnici:

$$C = c_{matrice} * \rho_{matrice} * d * A * M_{matrice} + c_{PCM}(T) * \rho_{PCM} * d * A * M_{PCM} \quad [kJ/K]$$

Závislost měrné tepelné kapacity pro účely modelu byla zjednodušena na lineární rostoucí funkci až do bodu teploty tání, poté je použita funkce klesající („trojúhelníková“ závislost).[17]

V Simulinku je funkce závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě zastoupena blokem s přesně definovanými body závislými na vstupním signálu (zde teplota vrstvy T_i), ke kterému je dále přiřazena určitá výstupní hodnota měrné tepelné kapacity [kJ/kg. K].



Obr. 2.7 Grafická podoba závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě v Simulinku

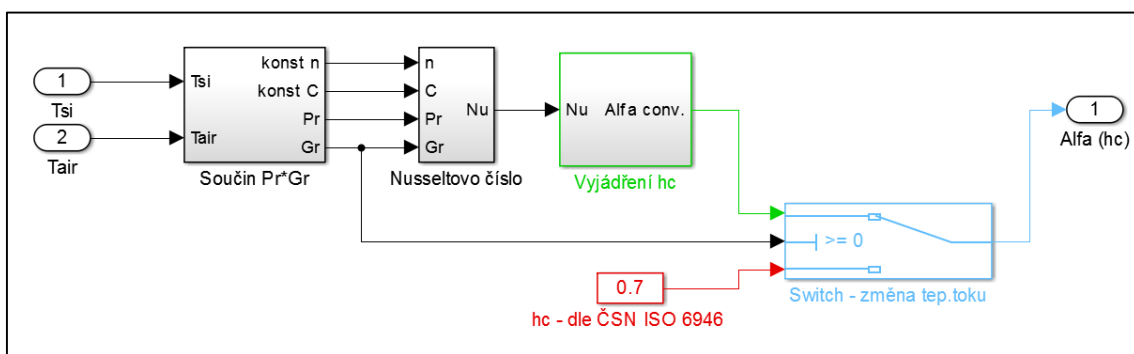
2.2.1.3 Součinitel přestupu tepla

Po prvotních simulacích při porovnání s naměřenými daty vzešlých z experimentálního modelu bylo nutné zavést výpočet součinitele přestupu tepla závislého na povrchové teplotě. Popis fyzikální podstaty problému včetně použitých vzorců je uveden v kapitole 1.2.3.

V programu Matlab [35] byli vytvořeny dva subsystemy, jeden pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí α_c a druhý pro výpočet součinitele přestupu tepla sáláním α_s .

Přestup tepla konvekcí

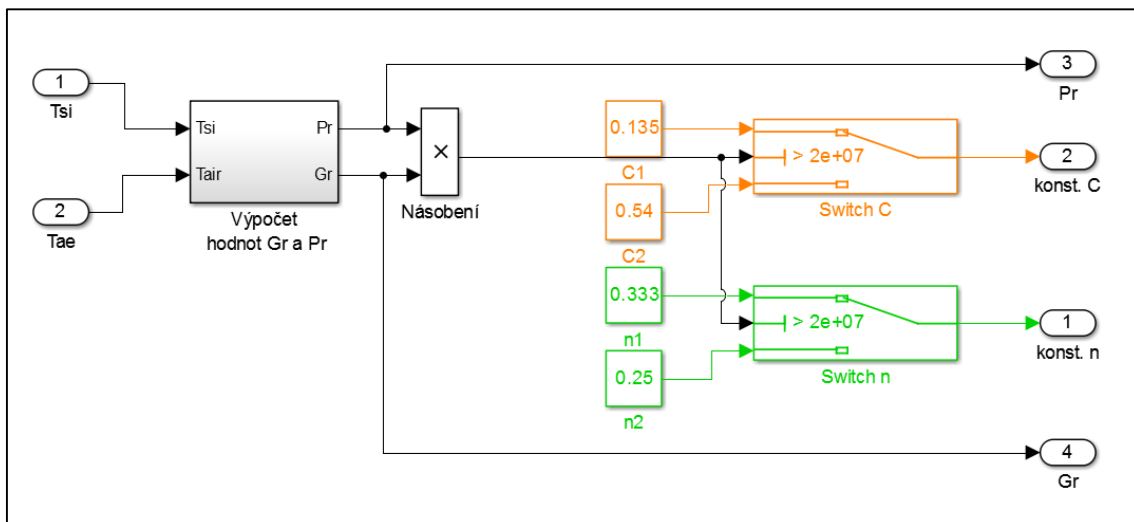
Na obr. č. je zobrazeno základní schéma výpočtu pro přestup konvekcí



Obr. 2.8 Model přestupu tepla konvekcí

Zde je důležité si povšimnout zejména modře zvýrazněného bloku – switche, který v případě, že se změní směr tepelného toku, respektive teplota vzduchu překoná teplotu povrchu podlahy, automaticky se změní součinitel α_c na hodnotu 0.7. Tato hodnota je udávána normou ČSN ISO 6946 [5] pro tepelný tok směrem dolů jako hodnota použitelná v běžných podmínkách. V ostatních případech, kdy teplota povrchu je vyšší a konstrukce podlahy vytápí přilehlý prostor je výpočet proveden pomocí kritériálních rovnic dle kap. 1.2.3.

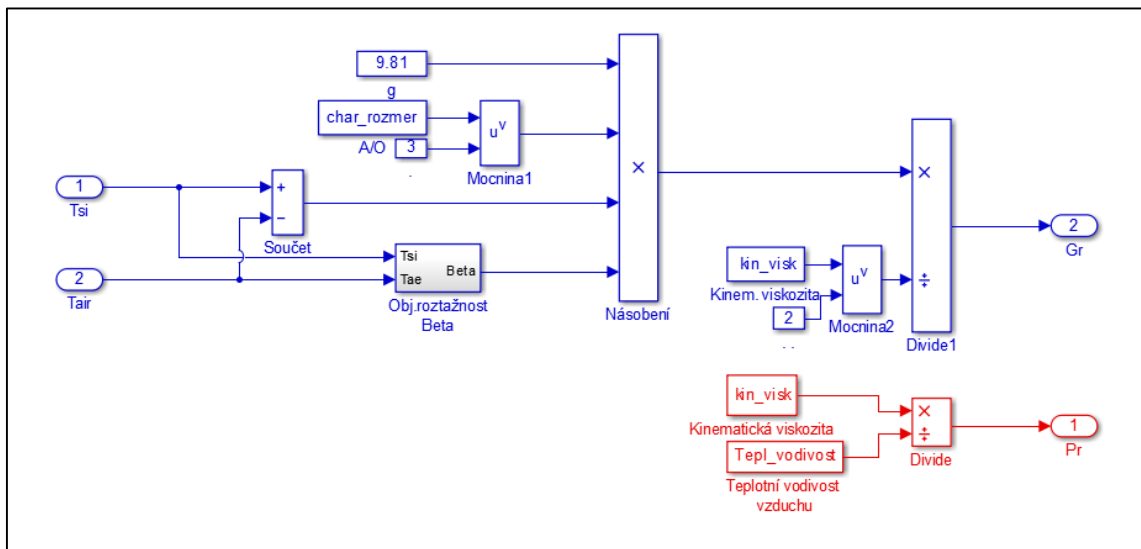
Na následujícím Obr. 2.9 je zobrazen podsystém výpočtu konstant C a n nutných pro výpočet Nusseltova čísla.



Obr. 2.9. Výpočet konstant kritériálních rovnic

Použité bloky - switche zde slouží pro automatický výběr vhodné konstanty C a n v závislosti na součinu hodnot Grashofova a Prandtlova čísla. Ve výpočtu figurují pouze konstanty odpovídající dvěma intervalům dle Tab. 1.2 v kap. 1.2.3.1. Prvního a druhého intervalu nebude dosaženo za běžných podmínek, ve kterých probíhá simulace modelu v této práci.

Výpočet Prandtlova a Grashofova podobnostního čísla je proveden dle kap. 1.2.3., podoba rovnic v Simulinku zobrazena na následujícím Obr. 2.10.

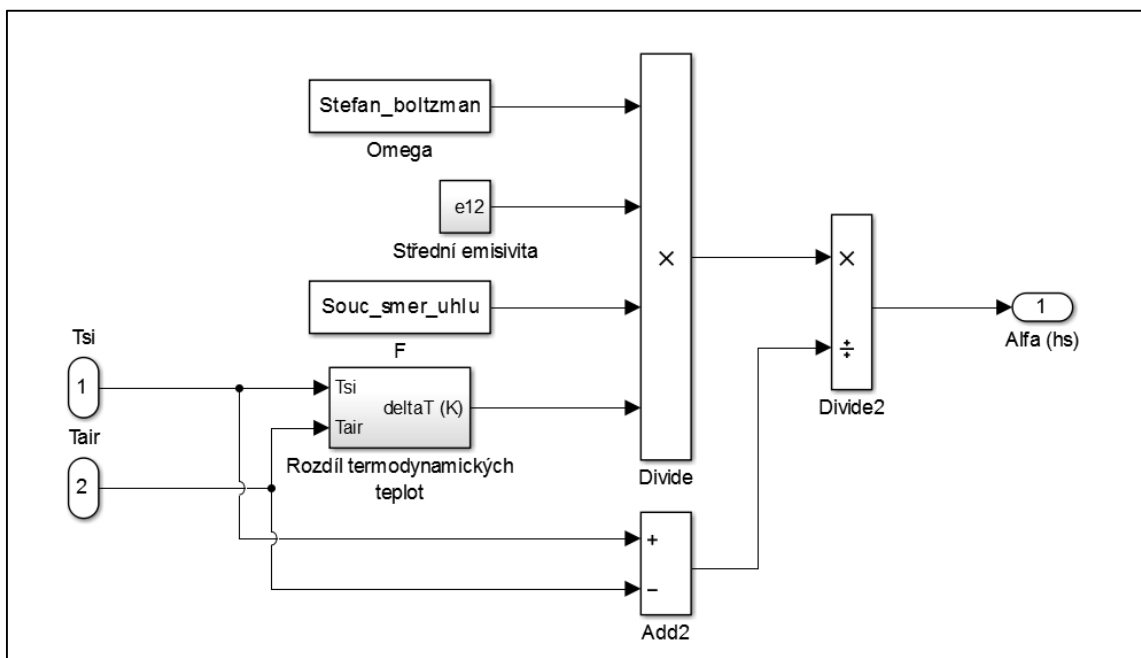


Obr. 2.10. Výpočet podobnostních čísel kritériálních rovnic v Simulinku

Modře zvýrazněné bloky jsou výpočet Grashofova čísla, jsou zde obsaženy výpočtové konstanty pro vzduch o teplotě 20°C, rozměrové charakteristiky povrchu a tíhové zrychlení země. Červeně zvýrazněné bloky dále reprezentují výpočet Prandtlova čísla, který závisí pouze na fyzikálních konstantách uvažované kapaliny – vzduchu.

Přestup tepla sáláním

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním α_s je podrobně vysvětlen v kapitole 1.2.3.2. Schéma modelu v Simulinku na Obr. 2.11.



Obr. 2.11. Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním v Simulinku

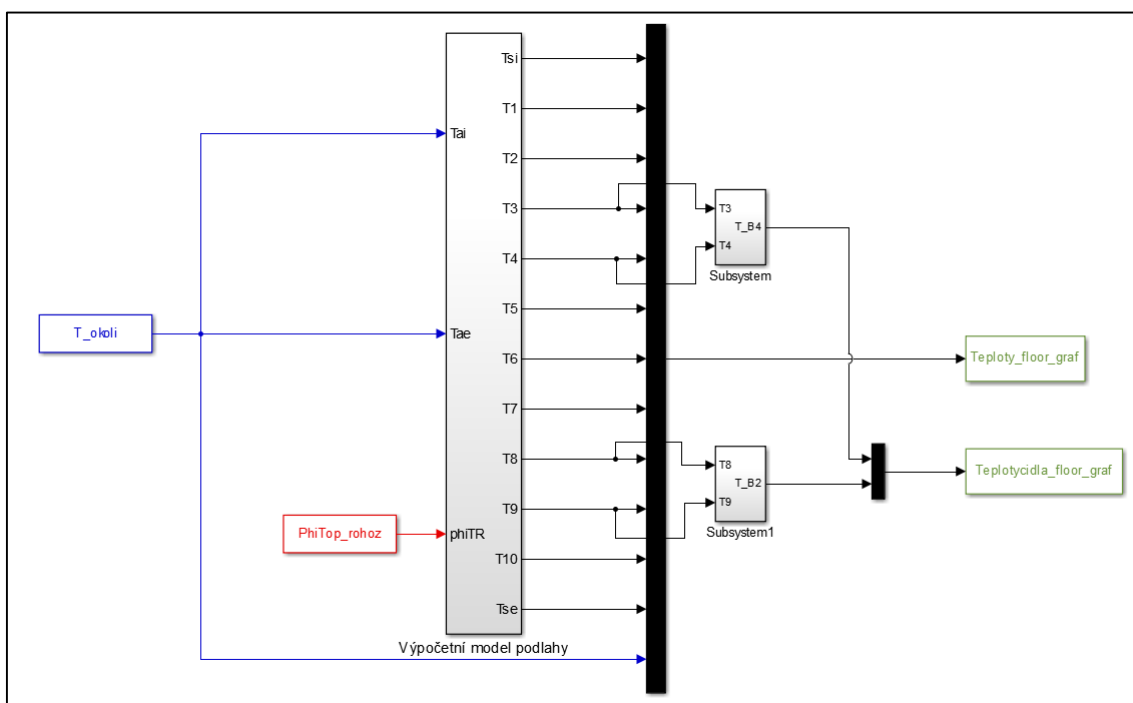
2.2.2 Validace výpočtového modelu

Pro ověření funkčnosti modelu podlahy bylo využito porovnání se dvěma typy experimentů provedených na experimentálním modelu popsaném v kapitole č. 2.1.2. Výsledky měření byly exportovány do programu Matlab. Následně proběhlo testování modelu a jeho součástí v závislosti na změnách jednotlivých parametrů, a tyto výsledky byly porovnávány s reálně naměřenými daty.

2.2.2.1 Výpočetní model podlahy

Pro posouzení funkčnosti výpočtového modelu podlahy byl vytvořen upravený výpočetní model, který odpovídá svým nastavením okrajových podmínek reálnému prostředí experimentálního modelu podlahy a svými tepelně technickými parametry použitým materiálům v modelu.

Na Obr. 2.12 je znázorněné schéma kompletního modelu akumulční podlahy v Simulinku se závislostí na T_{ae} (modře)



Obr. 2.12 Model podlahy v Simulinku

Jedinými proměnnými vstupujícími do modelu jsou teplota okolí naměřená pomocí čidla okolní teploty T_{ae} a dále příkon topné rohože v čase. Všechny ostatní vstupní hodnoty jsou zadány jako konstanty. Výstupem (zeleně) jsou po provedení simulace teploty v jednotlivých teplotních uzlech modelu odpovídajících umístění čidel v experimentálním modelu.

2.2.2.2 Vstupní hodnoty pro výpočet

Pro výpočet modelu podlahy bylo nutné definovat okrajové podmínky, které odpovídají prostředí, ve kterém bylo prováděno vlastní měření experimentálního modelu. Tyto hodnoty se dají rozdělit na hodnoty konstantní, které jsou nezávislé na výpočtovém čase a hodnoty, které přímo ovlivňují model během výpočtu. V Tab. 2.5. uvádím hodnoty použité u modelu určeného pro validaci.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla při vrchní straně jsou dále použity fyzikální konstanty pro vzduch o teplotě 20°C Tab. 2.6

Tab. 2.5 Parametry experimentálního modelu

Název veličiny	Jednotky	Horní strana	Akumulační vrstva						Izolační vrstva				Spodní strana
		Tsi	1.uzel	2.uzel	3.uzel	4.uzel	5.uzel	6.uzel	7.uzel	8.uzel	9.uzel	10.uzel	Tse
Velikost (výška uzlu)	(m)	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025	0.025	0
Plocha A	(m ²)	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225	0,4225
Tepelná kapacita	(J/KgK)	0	Dle TAB č. A č. (REF/PCM)						1270	1270	1270	1270	0
Obj.hmotnost	(Kg/m ³)	0							20	20	20	20	0
Tepelná vodivost	(W/mK)	0							0.04	0.04	0.04	0.04	0
Topná rohož	(W)	0	0	0	0	0	163	0	0	0	0	0	
Odpor při přestupu tepla	(m ² K/W)	$R(T_{se})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2+0,12

Tab. 2.6 Parametry vzduchu [34]

Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa

t	ρ	c	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^6$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr	α
[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	[W/(m.K)]	[m ² /s]	[Pa.s]	[m ² /s]		[10 ⁻³ /K]
-100	2,012	1022	1,62	7,88	11,8	5,86	0,744	-
-50	1,561	1013	2,04	12,9	14,6	9,35	0,727	-
-20	1,376	1009	2,26	16,28	16,3	11,85	0,727	3,962
0	1,275	1005	2,37	18,50	17,2	13,49	0,727	3,671
10	1,230	1005	2,45	19,82	17,8	14,47	0,727	-
20	1,188	1010	2,52	21,0	18,2	15,32	0,727	3,419
40	1,112	1013	2,65	23,53	19,2	17,27	0,727	3,200

A pro výpočet sálání horní strany modelu vůči okolí je dále uvažováno s emisivitou povrchu betonu $e=0,85$ a střední teplotou povrchů okolního prostředí 16°C.

2.2.2.3 Chyby měření

Každé měření a každá simulace je vždy zatížena chybami, které vyplývají jak z určité nepřesnosti měřících zařízení, tak také z chyb měření. Proto lze těžko definovat, do jaké míry je model ještě nepřesný, a kdy se již jeho zpřesňování odehrává na poli čisté „hry s čísly“. V následující tabulce č. jsou shrnuty jednotlivé odchylky měřících přístrojů, které byli k dispozici.

Tab. 2.7 Odchylky měření použitých přístrojů

Měřící přístroj	Tepelná vodivost		Tepelná kapacita	Teplota
Isomet 2141	0.015 - 0.7 W/mK		4.10 ⁴ - 3.10 ⁶ J/m ³ K	-20°C - 70°C
	5% čtení + 0.001W/mK	10% čtení	15% čtení + 1.10 ³ J/m ³ K	1°C
Měřící přístroj	Teplotní rozlišení		Přesnost měření	
Čidla Dallas DS18B20	9 - 12 PIN		-55°C - 125°C	
	0.5,0.25,0.125,0.0625 °C		0.5°C	

Na základě těchto hodnot bylo vytvořeno rozmezí, ve kterém se s určitou pravděpodobností mohou nacházet naměřené materiálové charakteristiky, a na jejich základě bylo poté provedeno několik variant simulací viz. kap. 2.2.2.4

Pro posouzení byli dále použity hodnoty naměřené pomocí teplotních čidel. Výsledná simulace průběhu teplot v modelu využívá jako okrajovou podmínku teplotu vzduchu měřenou stejným teplotním čidlem, jaká jsou použita v modelu. Toto čidlo bylo umístěno v kartonovém krytu vedle modelů ve výšce cca 80mm nad podlahou, což odpovídá přibližně polovině výšky modelu.

Druhou proměnnou okrajovou podmínkou je doba natápění topnou rohoží. Příkon topné rohože nebyl zaznamenáván během měření, ovšem bylo použito měřiče příkonu, kterým byla průběžně kontrolována jeho velikost. Bez výrazných změn tento příkon byl během natápění 68-69W. Což odpovídá po přepočtu na plochu 1m² 163W, které byli uvažovány ve výpočtovém modelu.

2.2.2.4 Posouzení nejistoty měření materiálů akumulční vrstvy.

Pro lepší posouzení vlivu jednotlivých materiálových charakteristik byla provedena simulace několika variant vycházející z reálně naměřených hodnot a započítáním možné chyby měření měřícím přístrojem.

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé materiálové charakteristiky se započítanou chybou měření dle výrobců měřícího přístroje.

Tab. 2.8 Odchyly při měření - varianty

Naměřené hodnoty přístrojem <i>Isomet 2141</i>					Odchylyka měření - minima a maxima					
Vz. PCM 4% - hladká strana					λ		c_p		c	
Obj.hm.	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
1979	1,69	1,79	0,945	904	1,71	1,67	1,88	1,70	950	859
1979	1,62	1,59	1,021	803	1,64	1,61	1,67	1,51	843	762
1979	1,64	1,62	1,008	821	1,65	1,62	1,71	1,54	862	779
Obj.hm. +3%	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
2038	1,69	1,79	0,945	878	1,71	1,67	1,88	1,70	922	834
2038	1,62	1,59	1,021	779	1,64	1,61	1,67	1,51	819	740
2038	1,64	1,62	1,008	797	1,65	1,62	1,71	1,54	837	756
Obj.hm. -3%	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
1920	1,69	1,79	0,945	932	1,71	1,67	1,88	1,70	979	885
1920	1,62	1,59	1,021	828	1,64	1,61	1,67	1,51	869	786
1920	1,64	1,62	1,008	846	1,65	1,62	1,71	1,54	889	803
Vz. Ref - hladká strana					λ		c_p		c	
Obj.hm.	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
2141	2,25	1,92	1,173	895	2,27	2,22	2,01	1,82	940	850
2141	2,19	1,81	1,207	847	2,21	2,17	1,91	1,72	890	804
2141	2,13	1,71	1,247	799	2,15	2,11	1,80	1,62	839	758
Obj.hm. +3%	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
2205	2,25	1,92	1,173	869	2,27	2,22	2,01	1,82	913	825
2205	2,19	1,81	1,207	822	2,21	2,17	1,91	1,72	864	781
2205	2,13	1,71	1,247	776	2,15	2,11	1,80	1,62	815	736
Obj.hm. -3%	λ	C_p	a	c	10%	-10%	5%+0,001	-5%+0,001	5%+0,001	-5%+0,001
2077	2,25	1,92	1,173	922	2,27	2,22	2,01	1,82	969	876
2077	2,19	1,81	1,207	873	2,21	2,17	1,91	1,72	917	829
2077	2,13	1,71	1,247	823	2,15	2,11	1,80	1,62	865	782

Pro znázornění a přehlednost dále bylo vybráno několik variant z odchylek měření a provedena simulace pro každou z nich. Viz tab. č. Pro varianty číslo 0, 2 a 5 je v kapitole č. 3.3.3. provedeno posouzení jejich odchylek.

Tab. 2.9 Varianty chyby měření

PCM_vzorek	λ	Obj.hm.	c	REF_vzorek	λ	Obj.hm.	c
Varianta 0	1,65	1979	843	Varianta 0	2,2	2140	840
Varianta 1	1,62	1920	979	Varianta 1	2,11	2077	969
Varianta 2	1,62	1920	803	Varianta 2	2,11	2077	782
Varianta 3	1,62	2038	922	Varianta 3	2,11	2205	913
Varianta 4	1,62	2038	756	Varianta 4	2,11	2205	736
Varianta 5	1,71	1920	979	Varianta 5	2,27	2077	969
Varianta 6	1,71	1920	803	Varianta 6	2,27	2077	782
Varianta 7	1,71	2038	922	Varianta 7	2,27	2205	913
Varianta 8	1,71	2038	756	Varianta 8	2,27	2205	736

Hmotnostní množství PCM = 4%

Hmotnostní množství PCM = 0%

Při simulaci jednotlivých variant dále byl posuzován vliv součinitele přestupu tepla a jeho zjednodušení a byla provedena korekce čidla měřící teplotu vzduchu v hale u modelu. Dále byla zkoumána potenciální možnost nesprávně umístěného čidla uprostřed akumulční vrstvy.

2.3 Model budovy

2.3.1 Úvod

Vytvořit komplexní výpočetní model budovy, který by dokázal pokrýt většinu fyzikálních způsobů přenosu tepla skrz jednotlivé konstrukce je velice obtížná úloha. Čas, který by byl potřeba na toto řešení je neúměrně vysoký s přihlédnutím k výsledkům, které jsou zatíženy chybami již na úrovni samotných materiálů a použitých okrajových podmínkách.

V rámci této Diplomové práce je cílem vytvořit zjednodušený model, s jehož pomocí lze zpětně odvodit vliv akumulární podlahy na tepelnou stabilitu vnitřního prostoru včetně vlivu využití látek s fázovou přeměnou. Cílem těchto simulací je tedy zejména porovnat výsledný vliv této konstrukce, nikoliv výpočet přesných teplot vnitřního prostředí a povrchů konstrukcí, jako v případě řešení úloh tepelné techniky.

2.3.2 Skladby konstrukcí a okrajové podmínky výpočtu

2.3.2.1 Umístění fiktivního modelu

Vhodné umístění modelu je velice důležité z hlediska následné interpretace naměřených dat a závěrů z nich. V případě, že model vystavíme okrajovým podmínkám, které nebudou odpovídat následné aplikaci tohoto modelu, je velice pravděpodobné, že případně navržené řešení založené na základě vlastní simulace nebude fungovat.

Lokalita

V našem případě byli použity meteorologická data z kapitoly 2.3.2.1. naměřená v hlavním městě Praha. Ovšem po porovnání s daty z jiných lokalit lze odvodit, že se jedná spíše o chladnější a tedy výše položenou lokalitu poblíž hlavního města.

Cílem této práce je posoudit možnosti běžného rodinného domu z pohledu jeho energetické soběstačnosti. Není ovšem cílem umístit tento objekt do odlehlých krajin, nýbrž do běžné příměstské zástavby. Z toho důvodu jsou tato data zcela vhodná pro daný účel, kterému slouží.

Pro výpočty oslunění je počítáno s následujícími zeměpisnými údaji:

Tab. 2.10 Zeměpisné umístění lokality

Zeměpisná šířka	49°
Zeměpisná délka	14°
Nadmořská výška	366 m.n.m.
Azimut jižní stěny	180°

Teplota zeminy

Při reálném provozu budovy dochází v průběhu roku k mírné změně teploty zeminy, která je ovlivněna jak venkovní teplotou vzduchu, tak také tepelnými zisky skrz konstrukci podlahy. Ve výpočtech je uvažováno s konstantní teplotou zeminy 9°C.

Tato hodnota odpovídá roční průměrné teplotě venkovního vzduchu. Zejména u menších staveb dochází v okrajových zónách podlahy k většímu prochlazení. Ve výpočtech je ovšem tento jev zanedbán s tím, že budova je dobře tepelně izolována zejména v oblasti podlahy. Viz konstrukce budovy v kap. 2.3.2.4.

2.3.2.2 Meteorologická data

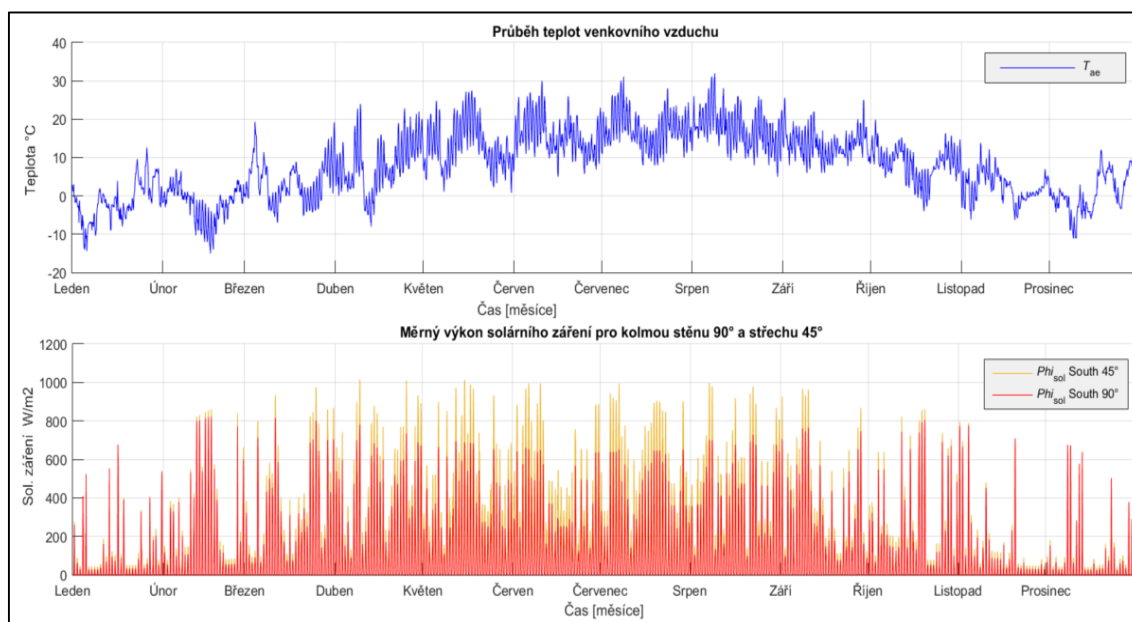
Pro výpočet simulace modelu budovy bylo využito meteorologický dat pro lokalitu Praha pořízených v roce 1995 z databáze společnosti Americké společnosti pro vytápění, chlazení a větrání (zkr. ASHRAE)(odkaz). Tyto data obsahovali zejména venkovní teplotu, směr a intenzitu větru a sluneční ozáření na horizontální rovinu. Z těchto dat bylo pomocí tabulkového programu Excel (odkaz) dopočítáno sluneční ozáření na svislé stěny a rovinu o sklonu 45°.

Pro představu o typických hodnotách je v Tab. 2.11. uvedena průměrná venkovní teplota pro jednotlivé měsíce a dále jsou uvedeny hodnoty průměrné intenzity sluneční radiace a měsíční úhrny slunečního záření pro 45° a 90° rovinu orientovanou na JIH.

Dále v grafu č. jsou zobrazeny průběhy teplot a intenzity sluneční radiace po hodinových odstupech pro celý rok.

Tab. 2.11 Průměrné hodnoty solárního záření a venkovní teploty po měsících

Měsíc	Te (°C)	G - Jih 90° (W/m ²)	Q – Jih 90° (kWh/m ²)	G - Jih 45° (W/m ²)	Q – Jih 45° (kWh/m ²)
Leden	-1,50	79,98	22,2	90,56	25,1
Únor	-2,06	171,04	51	190,80	56,9
Březen	3,55	189,12	73,1	236,92	91,6
Duben	7,94	205,31	87,9	284,98	122,0
Květen	13,01	172,65	86,4	273,50	136,9
Červen	15,63	165,26	81,8	287,44	142,3
Červenec	17,32	178,58	91,0	297,05	151,3
Srpen	17,62	203,94	94,5	298,72	138,5
Září	13,32	179,51	71,6	237,01	94,6
Říjen	8,33	156,74	55,7	184,44	65,6
Listopad	2,23	96,00	27,5	109,09	31,2
Prosinec	0,83	84,70	22,3	91,63	24,1
Sourhn	(-)	(-)	765	(-)	1080



Graf. 2.1 Průběh venkovních teplot a solárního záření během roku

Pro lepší představu o venkovní teplotě jsou uvedeny v tab. č. souhrny měsíčních průměrů teplot venkovního vzduchu dle ČHMU (odkaz) za roky 1961 – 90, a dále jednotlivé měsíční teploty za roky 2010 – 2015.

Tab. 2.12 Meteorologická data

ČHMU Praha-Karlovy

Rok	1961 - 90	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Průměr	ASHRAE 1995
Leden	-0,9	-3	2	2,5	1	2,5	2,5	1,3	-1,5
Únor	0,8	0	1	-2,5	1	4,5	2	1,0	-2,1
Březen	4,6	5	7,5	8	1,5	8	6	6,0	3,6
Duben	9,2	11	13,5	11	11	12,5	10	11,5	7,9
Květen	14,2	13	16	17,5	14	14	15	14,9	13,0
Červen	17,5	18,5	19	20	18	18	17,5	18,5	15,6
Červenec	19,1	23,5	18	22	22,5	22	22,5	21,8	17,3
Srpen	18,5	19	20	22,5	20	18	24	20,6	17,6
Září	14,7	13,5	17	16	14	16	15	15,3	13,3
Říjen	9,7	8	10	9	11	12	9	9,8	8,3
Listopad	4,4	7	4	7	6,5	7	8	6,6	2,2
Prosinec	0,9	-3,5	4,5	2	3	3	7	2,7	0,8
Průměr	9,4	9,3	11,0	11,3	10,3	11,5	11,5	10,8	8,0

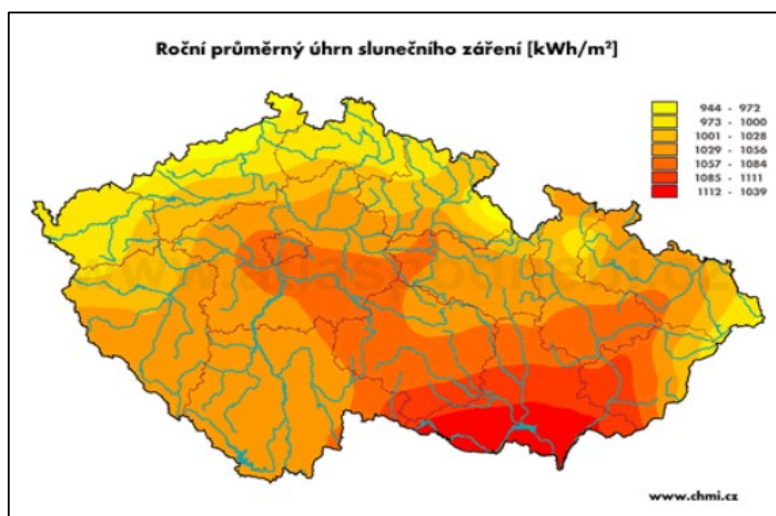
ČHMU Praha-Ruzyně

Rok	1961 - 90	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Průměr	ASHRAE 1995
Leden	-2	-4	-1,5	2,5	-1,5	0,5	2	-0,3	-1,5
Únor	-1	-2	-2	-2,5	-1,5	2,5	0,5	-0,8	-2,1
Březen	2,5	4	5	8	-1	7	5	4,7	3,6
Duben	7,5	9	12	11,5	9	10,5	8	10,0	7,9
Květen	12,5	12	14	17,5	12	12,5	13	13,5	13,0
Červen	16	17,5	17,5	20	16	16,5	16,5	17,3	15,6
Červenec	17,5	21	17	22	20	19,5	21	20,1	17,3
Srpen	17	17,5	18,5	22,5	18	17	22,5	19,3	17,6
Září	13	12,5	15,5	15,5	12,5	15	13,5	14,1	13,3
Říjen	8	7	8	9	9	10,5	8	8,6	8,3
Listopad	3	5	3	7	4	6	7	5,3	2,2
Prosinec	-0,5	-5	3	2	2	2,5	5	1,6	0,8
Průměr	7,8	7,9	9,2	11,3	8,2	10,0	10,2	9,4	8,0

Teploty v tab. č. jsou s přesností na 0,5°C vzhledem k ručnímu odečítání hodnot z grafu na stránkách ČHMU (odkaz). Přesnější data jsou k dispozici pouze za úplatu.

Pro porovnání je na obr. č. shrnutí průměrných ročních slunečních zisků na horizontální rovinu. Pro lokalitu Praha je roční průměr zhruba 1050 kWh/m² a rok, přičemž použitá data pro model mají tuto hodnotu nižší – 959 kWh/m².

Celoroční úhrn slunečního záření na orientovanou rovinu 45° je 1080 kWh/m² a na svislou rovinu o 90° dopadne 765 kWh/m² za rok.

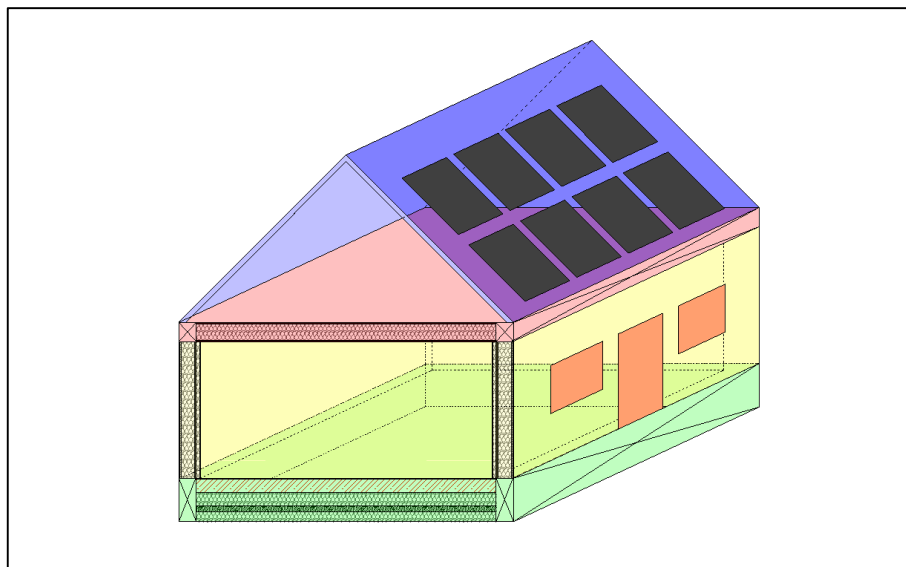


Obr. 2.13 Roční úhrn slunečního záření pro Českou republiku [28]

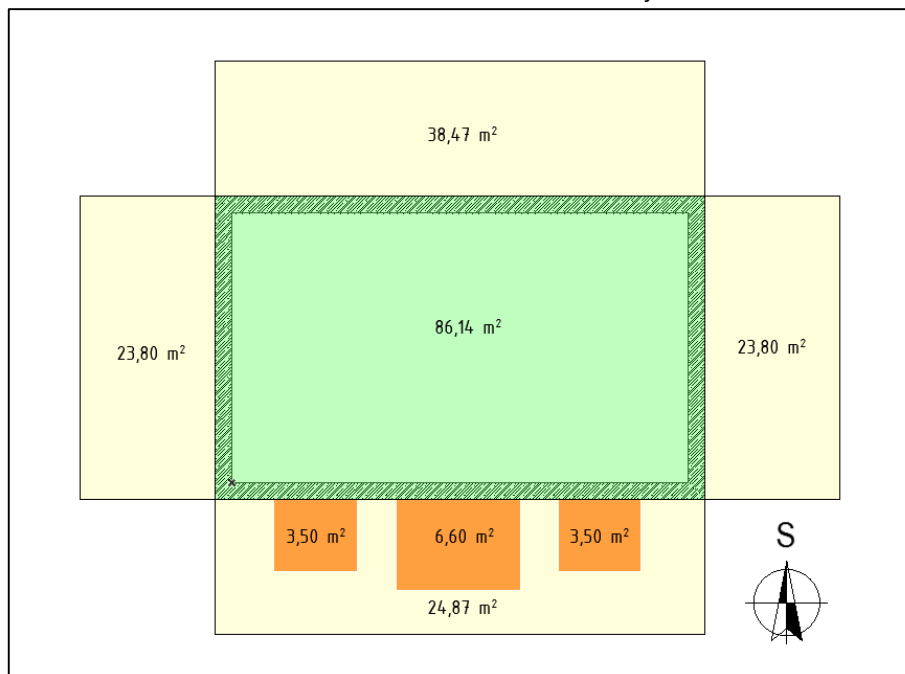
2.3.2.3 Konstrukce budovy

Koncepce a návrh budovy vychází z obecných principů výstavby nízkoenergetických až pasivních dřevostaveb. Nebyli řešeny detaily skladeb z hlediska tepelné techniky, ovšem byli dodrženy zásady pořadí skladeb tak, aby odpovídali přibližně dnešním standardům ve výstavbě.

Konstrukce stěn a stropu je navržena jako difúzně otevřená lehká rámová konstrukce s výjimkou podlah, kde je uvažováno s akumulací podlahou dle poznatků vycházejících z této DP a z práce předešlé (odkaz). Půdní prostor je pro zjednodušení navržen jako nevytápěný s uvažovanou venkovní výpočtovou teplotou. Střešní konstrukce tedy slouží pouze jako ochrana proti zatečení a dále jako nosič fotovoltaických panelů.



Obr. 2.14 Vizualizace simulovaného objektu



Obr. 2.15 Půdorys simulovaného objektu

V následujících tabulkách jsou uvedeny skladby všech konstrukcí použitých pro simulační model a jeho následné vyhodnocení.

Pro návrh skladby stěn byla využita difúzně otevřená konstrukce.

Stěna obvodová		tl.	lambda	c	ρ	Odpor vrstvy R (m ² K/W)
		(mm)	(W/mK)	(J/kgK)	(Kg/m ³)	
1.	SDV Fermacell	0,018	0,352	1100	1150	0,051
2.	Steico Flex	0,05	0,042	2100	50	1,190
3.	OSB deska	0,025	0,15	1580	630	0,167
4.	Steico Flex	0,2	0,042	2100	50	4,762
5.	Steico Universal	0,024	0,052	2100	270	0,462
6.	Baumit vnější omítka	0,003	0,495	900	1250	0,006

$$R_{\text{celkové}} = \underline{\underline{6,638}}$$

$$U_{\text{celkové}} = 0,151$$

Stropní konstrukce byla uvažována zjednodušeně bez vrstev pojistných hydroizolací a parozábran, ve skutečnosti je tato konstrukce doplněna o několik dalších vrstev, které ovšem nemají výrazný vliv na tepelně-technické vlastnosti.

Střecha		tl.	lambda	c	ρ	Odpor vrstvy R (m ² K/W)
		(mm)	(W/mK)	(J/kgK)	(Kg/m ³)	
1.	SDV Fermacell	0,018	0,352	1100	1150	0,051
2.	Steico Flex	0,24	0,042	2100	50	5,714
3.	OSB deska	0,025	0,15	1580	630	0,167

$$R_{\text{celkové}} = \underline{\underline{5,932}}$$

$$U_{\text{celkové}} = 0,169$$

Konstrukce podlahy vychází z návrhu akumulární podlahy, a slouží tedy jako stabilizační prvek vnitřního prostředí během celého roku. Základní varianta pro výpočty viz. tab. č.

Podlaha		tl.	lambda	c	ρ	Odpor vrstvy R (m ² K/W)
		(mm)	(W/mK)	(J/kgK)	(Kg/m ³)	
1.	Korek lisovaný	0,003	0,064	1880	150	0,047
2.	Beton akumulární	0,2	2,2	840	2140	0,091
3.	Isover EPS	0,2	0,037	1270	20	5,405
4.	Beton hutný	0,08	1,36	1020	2300	0,059
5.	EPS	0,15	0,048	840	135	3,125

$$R_{\text{celkové}} = \underline{\underline{8,727}}$$

$$U_{\text{celkové}} = 0,115$$

Pro okenní výplně je uvažováno s průměrnou hodnotou $U_{em}=0,8W/m^2K$ pro celou plochu oken, která činí 13,6m². Při výpočtu solárních zisků je tato plocha zmenšená o velikost rámu (10% z plochy okna) a uvažována hodnota propustnosti zasklení $g=0,5$.

2.3.2.1 Fotovoltaický systém pro vytápění

Pro výrobu elektrické energie je počítáno s nespécifikovanými panely na jižní straně sedlové střechy o sklonu 45° s účinností přeměny solární energie 15,2% (16% PV + 95% Distribuce). Účinná plocha panelů 50m² (plocha jižně orientované sedlové střechy je 60,8m² – 82%).

2.3.2.2 Potřeba tepla na vytápění – orientační výpočet

Návrh vhodné obálky budovy byl vytvořen pomocí jednoduchého výpočtového programu v tabulkovém programu Excel, kde za daných okrajových podmínek stanovených dle ČSN 730542 a ČSN 730540 byla vypočítána přibližná hodnota potřeby tepla na vytápění objektu.

Pro výpočet měrné tepelné ztráty byla použita obálková metoda pro stanovení tepelných ztrát viz. Tab. 2.13

Tab. 2.13 Obálka budovy – výpočet

Měrná tepelná ztráta a průměrný součinitel prostupu tepla								
Druh konstrukce	Referenční budova (stanovení požadavku)				Hodnocená budova			
	Plocha	Součinitel prostupu tepla	Redukční čísel	Měrná ztráta prostupem tepla	Plocha	Součinitel prostupu tepla	Redukční čísel	Měrná ztráta prostupem tepla
	A (m ²)	U (W/m ² K)	b (-)	H _t (W/K)	A (m ²)	U (W/m ² K)	b (-)	H _t (W/K)
SO 01	111	0,3	1,00	33,3	111	0,151	1,00	16,8
OZ 01	13,6	1,5	1,00	20,4	13,6	0,8	1,00	10,9
PDL 01	86,14	0,45	0,36	14,0	86,14	0,132	0,36	4,1
STR.K 01	86,15	0,24	1,00	20,7	86,15	0,169	1,00	14,6
Celkem	298,89			90,1	298,89			48,1
Tepelné vazby		$\Delta U_{t,bm}$	0,02	6,0		$\Delta U_{t,bm}$	0,02	6,0
Celková měrná ztráta prostupem tepla H _T				96,1				54,1
Průměrný součinitel prostupu tepla (W/m ² K)	Požadovaná hodnota				U _{em}			0,18
	U _{em,n}			0,32	Splňuje požadavek			
	Doporučená hodnota							
	U _{em,rec}			0,24				
Klasifikační třída obálky budovy podle přílohy C				0,56	Třída B - Úsporná			

Stanovení prostupu tepla obálkou budovy

Měrná ztráta prostupem tepla H _T	W/K	54,1
Průměrný součinitel prostupu tepla U _{em} = H _T /A	W/(m ² .K)	0,18
Doporučený součinitel prostupu tepla U _{em,rec}	W/(m ² .K)	0,24
Požadovaný součinitel prostupu tepla U _{em,n}	W/(m ² .K)	0,32

V tab. č. jsou pro jednotlivé měsíce v roce stanoveny průměrné tepelné zisky a ztráty v závislosti na hodnotách průměrných tepelných zisků ze slunečního svitu, vnitřních zisků, ztráty nuceným větráním a měrné ztráty prostupem.

Vnitřní zisky budovy jsou uvažovány průměrnou hodnotou 3 W/m² dle doporučení pro rodinné domy dle [4].

V závislosti na celkové tepelné bilanci modelu objektu byla doložitelná průměrná potřeba tepla na vytápění v otopném období (Leden – Duben a Říjen - Prosinec). Viz. Tab. 2.13

Tab. 2.14 Tepelné zisky a ztráty – měsíční metoda

Měsíc	(-)	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Suma
Dny	(-)	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	(-)
$\theta_{prům,ext}$	(°C)	-3,9	-3	0,3	3,7	8,5	14,3	16,6	16,6	10,3	6,6	1,2	-2,2	(-)
$\theta_{prům,int}$	(°C)	20	20	20	20	22	24	24	24	22	20	20	20	(-)
$I_{sol,jih}$	(W/m ²)	35,8	57	89,7	91,4	94,1	92,2	97,8	106,5	101,9	69,8	34,8	22,3	(-)
$I_{sol,V,Z}$	(W/m ²)	18,8	31,6	60,9	81,2	108,3	117,1	113,1	93,7	66,8	37,4	18,3	13,1	(-)
$I_{sol,JV,JZ}$	(W/m ²)	26,6	44,2	79,8	88,4	101,3	101,7	105,6	102,7	91,9	67,6	32,3	18,3	(-)
$I_{sol,Sever}$	(W/m ²)	10	12,2	17,3	21,3	23,1	22,4	21,2	18	13,5	12,5	9,8	8,8	(-)
$Q_{T,i}$	(kWh)	840	757	693	555	475	330	260	260	398	471	640	781	6459
$Q_{V,i}$	(kWh)	202	182	167	134	114	80	63	63	96	113	154	188	1556
Q_{int}	(kWh)	160	149	160	154	160	154	160	160	154	160	154	160	1884
$Q_{sol,jih}$	(kWh)	193	308	484	493	508	498	528	575	550	377	188	120	4822
$Q_{sol,sever}$	(kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{sol,JV,JZ}$	(kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{sol,V,Z}$	(kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rozdíl		690	482	216	40	-79	-243	-365	-412	-210	48	451	689	

Tab. 2.15 – Výpočet potřeby tepla na vytápění – měsíční metoda

Celková potřeba tepla na vytápění	2616,3 kWh/rok	
Měrná potřeba tepla na vytápění	37 kWh/m2.rok	
Vnitřní podlahová plocha A	71,5 m2	
Tepelné ztráty větráním a prostupem		
Měrná ztráta prostupem tepla $H_{s,c}$	47	W/K
Součinitel návrhové tepelné ztráty větráním $H_{ve,i}$	11,3832	W/K
Návrhová tepelná ztráta prostupem $Q_{T,i}$	TAB č.	kWh
Návrhová tepelná ztráta větráním $Q_{V,i}$ (nucené)	TAB č.	kWh
Celková tepelná ztráta prostupem $Q_{T,i,c}$	6458,8	kWh
Celková tepelná ztráta větráním $Q_{V,i,c}$	1555,7	kWh
Větrání		
Návrhová výměna vzduchu n	0,6	1/h
Objem vytápěného prostoru	186	m3
Výměna vzduchu ve vytápěném prostoru V_i	111,6	m3/h
Účinnost ZZT	70%	
Vnitřní tepelné zisky		
Celkové Tepelné zisky z vnitřních zdrojů $Q_{int,c}$	1884,2	kWh/rok
Tepelný zisk z vnitřních zdrojů Q_{int}	TAB č.	kWh
Vnitřní podlahová plocha A	71,5	m2
Obyvatelé + spotřebiče TAB 4-25	3	W/m2
Tepelný tok z vnitřních zisků ϕ_{int}	214,5	W
Vnější tepelné zisky - slunce		
Celkové Sluneční tepelné zisky Q_{sol}	4821,9	kWh/rok
Sluneční tepelný tok $Q_{sol,k}$	TAB č.	kWh
Průměrná energie slunečního záření $I_{sol,k}$ - dle sv.stran	TAB č.	kWh/m2
Okenní otvor 1 - JIH		
Plocha okna vč.rámu	13,6	m2
Procento zasklení	88%	%
Účinná sběrná plocha $A_{sol,k}$	12,00	m2
Korekční činitel na energ.propustnost a stínění $g_{gl,n,sh}$	0,5	(-)
Korekční činitel pro pohyblivá stínící zařízení	1	(-)
Korekční činitel stínění na vnější překážky $F_{sh,ob,k}$	0,9	

2.3.3 Výpočetní model budovy

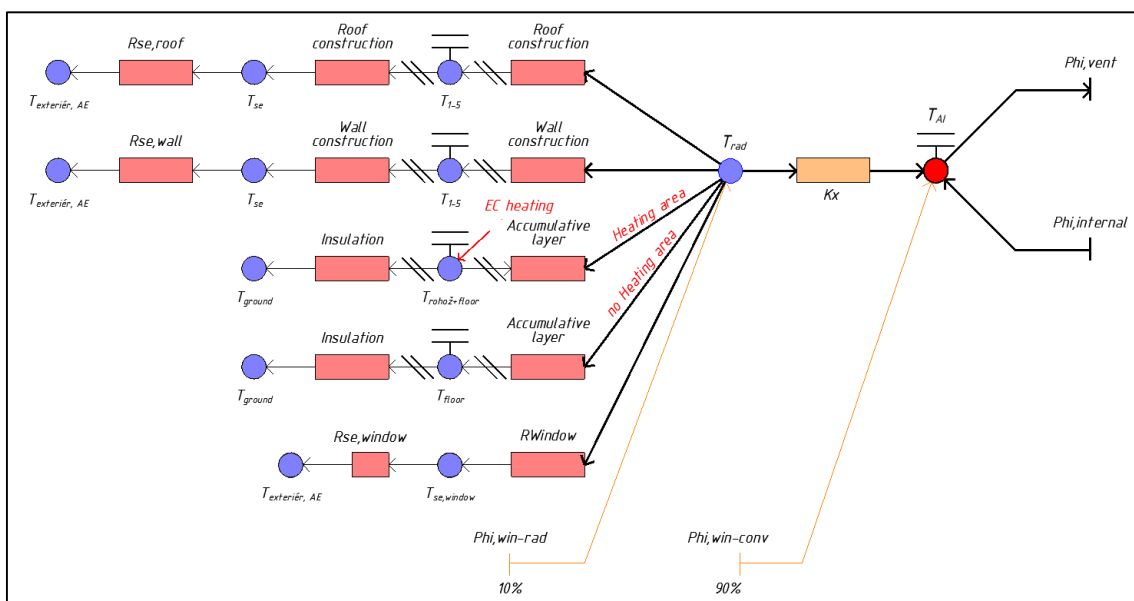
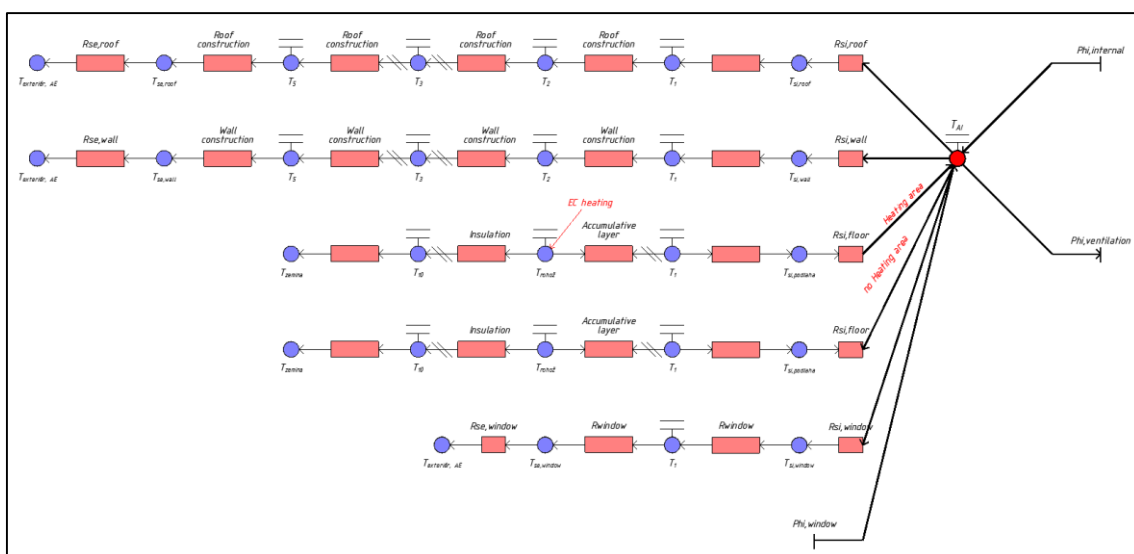
K tomu, abychom mohli objektivně posoudit výhody a nevýhody využití podlahového elektrického vytápění a dalších souvislostí, je potřeba vytvořit dostatečně přesný a efektivní výpočetní model budovy, jehož výpočet ovšem netrvá příliš dlouho.

2.3.3.1 Popis konceptu modelů budovy a kritéria výběru

Byli sestaveny dva modely pro vzájemné porovnání:

V případě modelu č.1 (obr.č.) je vnitřní teplotní uzel T_{ai} využit jako cílový uzel pro zakončení všech dílčích systémů modelu (střecha, stěna, podlaha, ventilace atd.).

V případě modelu č.2 (obr.č.) je tento uzel (T_{ai}) napojen ke konstrukcím přes fiktivní uzel T_{rad} , který simuluje vnitřní fiktivní povrchovou teplotu jednotlivých konstrukcí a přes určitý vypočítaný poměr součinitelů přestupu tepla pro sálání a konvekci komunikuje s uzle T_{ai} . Více o tomto modelu v (odkaz na clanek kopeckeho).



Z pokusných ověřovacích simulací byl následně vybrán nejvhodnější model, který více odpovídá potřebám pro následné simulace a jejich vyhodnocení. Posuzovaná kritéria byla následující:

- Rychlost výpočtu
- Přesnost řešení
- Složitost modelu
- Kontrolovatelnost výsledků

2.3.3.2 Popis výpočtů vybraných systémů modelu

Vzhledem k tomu, že základní přenos vedení tepla v jednotlivých konstrukcích je již popsán v části o výpočtovém modelu podlahy, budou zde uvedeny pouze části modelu, které jsou specifické pro vlastní výpočtový model budovy.

Zdroj elektrické energie – PV panely

Pro výpočet potřebného výkonu jako zdroje elektrické topné rohože bylo potřeba stanovit maximální možný výkon fotovoltaických panelů na základě jejich účinnosti, dále velikost plochy těchto panelů a plochu vytápěné podlahy tak, aby bylo možné tento výkon přepočítat na tuto plochu. Pro potřeby simulace je vypočítán elektrický výkon topné rohože dle vzorce:

$$\theta_{TR} = \frac{G_{sol} * A_{PV} * \eta}{A_f} \quad [W/m^2]$$

Kde:

G_{sol} = intenzita solárního záření pro nakloněnou rovinu 45° (W/m²)

A_{pv} = Velikost účinné plochy PV panelu (m²)

η = Účinnost PV panelu (-)

A_f = Celková podlahová plocha vytápěné podlahy (m²)

K těmto výpočtům posloužil tabulkový program Excel, ve kterém byli stanoveny pro každý výpočetní krok příslušné hodnoty dostupného výkonu.

Sluneční radiace okny

Řídící rovnice pro výpočet tepelného toku sluneční radiací dopadající do interiéru skrz výplně:

$$\theta_{solar} = g_{\theta} * G_{gt} * A_{glass} * F_{cover} \quad [W]$$

$$g_{\theta} = g_o * \left(1 - tg^a * \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad [-]$$

Kde:

g_{θ} = energetická propustnost pro daný úhel dopadu (-)

G_{gt} = Měrný tepelný tok na orientovanou plochu (W/m²)

A_{glass} = plocha zasklení bez rámu okna (m²)

F_{cover} = Součinitel stínění pevnými překážkami (-)

g_o = energetická propustnost daná výrobcem okna (-)

a = součinitel typu zasklení (zde $a=1$) (-)

θ = úhel dopadu mezi normálou okna a paprskem slunce (°)

Vnitřní zisky

Zatížení vnitřního prostředí tepelnými zisky od osob, spotřebičů a dalších zdrojů tepla:

$$\theta_{internal} = A_{floor} * q_{internal}$$

Kde:

$q_{internal}$ = průměrné denní vnitřní tepelné zisky (W/m²)

A_{floor} = celková podlahová plocha modelu

Porovnání součinitelů přestupu tepla

Pro validace modelu podlahy byl využit výpočet součinitele přestupu tepla dle kap. 1.1.2. a kap. 2.2.1.3. Nevýhodou použití tohoto výpočtu je ovšem jeho složitější vyjádření, které prodlužuje dobu výpočtu a způsobuje větší nepřehlednost ve výsledném komplexním modelu. Z toho důvodu bylo provedeno porovnání dvou typů výpočtů součinitelů přestupu konvekcí a sáláním.

Pro výpočet konvekce byl postup dle kritériálních rovnic porovnán s výpočtem dle zjednodušeného výpočtu uvedeného například v [10]. Rovnice:

$$h_c = 2 * (T_{si} - T_{air})^{0.25} \quad [W/m^2K]$$

Kde:

T_{si} = Teplota povrchu podlahy (°C)

T_{air} = Teplota vzduchu ve větší vzdálenosti od podlahy (°C)

Pro výpočet přestupu tepla sáláním byl složitější výpočet zohledňující emisivitu a teplotu okolí nahrazen zjednodušeným výpočtem dle EN ISO 6946, kde se zohledňuje pouze střední teplota mezi povrchem a teplotou okolí (v dobře izolovaných domech lze uvažovat, že $T_{air} \approx T_{si}$), lze uvažovat jako rozdíl teplot teplotu povrchu podlahy a teplotu vzduchu v okolí.

$$h_r = 4 * \sigma * \varepsilon * T_m \quad [W/m^2K]$$

Kde:

T_m = Střední termodynamická teplota z teploty povrchu podlahy a okolí (K)

σ = Stefan-Boltzmanova konstanta (W/m²K⁴)

ε = Emisivita povrchů (-)

Větrání – nucená ventilace

Řídící rovnice pro výpočet tepelného toku větráním:

$$\theta_{vent} = C_{air} * n * (1 - \eta) * (T_{ai} - T_{ae}) \quad [W]$$

Kde:

C_{air} = Tepelná kapacita vzduchu (J/kgK)

n = násobnost výměny vzduchu v budově

η = Účinnost rekuperace VZT

T = teplota vzduchu v interiéru a exteriéru

2.3.3.3 Zdroje tepla a způsoby jejich regulace

Kapitola regulace vytápění akumulčních podlah by mohla být velice obsáhlá. Vzhledem k omezeným možnostem při zpracování této DP bylo rozhodnuto ponechat řízení teploty pouze na tzv. ON/OFF regulátoru. Pro potřeby vyhodnocení simulací je uvažováno se dvěma zdroji energie.

Zdroj tepla č.1 – Topná rohož

V rámci experimentálního modelu podlahy byl validován model podlahy se zabudovanou elektrickou topnou rohoží. Tato topná rohož pro potřeby výpočtového modelu má max. výkon 66W/m, přičemž při nedostatku elektrické energie z fotovoltaických panelů se výkon snižuje na aktuálně dostupnou hodnotu.

Jako okrajové podmínky pro výpočet množství vyrobené elektrické energie sloužila meteorologická data popsaná v kap.2.3.2.1, přičemž byla využita data solární radiace dopadající na horizontální plochu G_{hor} . Tyto hodnoty byly přepočteny na výkon G_{sol} na nakloněnou rovinu o sklonu 45°. Výsledné hodnoty topného výkonu rohože byli doloženy dle vzorce popsaného v následující kapitole 2.3.3.3.

Pro účely posouzení stability vnitřního prostředí modelu budovy bylo využito řízení pomocí modulu pracujícího na principu termostatu, kdy byl nastaven teplotní rozsah na 19,5°C pro zapnutí a 21,5°C pro vypnutí napájení topné rohože. Do tohoto modulu byl zaveden signál aktuální teploty v interiéru T_{ai} , na jejím základě dochází k jednoduché regulaci.

Zdroj tepla č.2 – Nespecifikovaný zdroj tepla – (doplňkový zdroj tepla)

Pro zjištění celkové energie potřebné k udržení vnitřní teploty v rozmezí teplotního komfortu kolem 20°C během topného období je použit zdroj o konstantním výkonu 2,0kW, který zastupuje fiktivní elektrický přímotop v místnosti. Tento zdroj je přímo napojen na vnitřní teplotní uzel se 100% účinností přenosu energie.

Princip zjištění potřeby tepla na vytápění spočívá v nastavení regulace zdroje tak, aby udržoval teplotu v budově co nejbližší hodnotě 20°C v případě, kdy není tato hodnota dodržena. Pro zajištění autority topné rohože (zdroj č.2) je rozsah „termostatu“ nastaven na hodnoty 19°C pro zapnutí a 21°C pro vypnutí toku měřené energie.

2.3.3.4 Nastavení simulace

Pro ustálení jednotlivých teplotních uzlů před vlastní simulací je nutné nechat výpočet proběhnout určitou dobu naprázdno pouze s předem definovanými podmínkami, které způsobí, že na počátku vlastní simulace (zde 1.Ledna) budou všechny teplotní uzly v modelu mít vhodné „počáteční“ podmínky.

Vlastní výpočet celoroční simulace probíhá v půlhodinovém kroku po celý rok, to znamená celkem $365 \times 24 \times 2 = 17520$ výpočetních kroků.

Před vlastním výpočtem je ovšem doplněn dvouměsíční úsek, který je tvořen stejnými vstupními daty pro měsíc Listopad a Prosinec. Simulace tedy začíná za stejných okrajových podmínek, na kterých také končí ke konci roku.

Celkový počet výpočetních kroků je $17520 + 60 \times 48 = 20\,400$

Po toto 60ti denní období jsou nastaveny zcela identické okrajové podmínky včetně systému vytápění.

Samotný výpočet a jeho řešení je poté řešeno metodou ODE45 – explicitní metoda Runge-Kutta pro řešení diferenciálních rovnic s maximálním krokem 1800s v použitém programu Matlab, respektive nástavby Simulink[35]

2.3.4 Energetické vyhodnocení přínosů akumulční podlahy

Pro určení potřeby tepla na vytápění byla zvolena vnitřní teplota v období vytápění 20°C. Na základě této teploty je vypočítána potřeba tepla z dodatečného tepelného zdroje pro její zajištění. Byli sestaveny varianty, které byly následně podrobeny simulaci ve výpočtovém modelu tak, aby byl přehledně vidět přínos jednotlivých energetických vstupů do budovy na výslednou teplotu v místnosti. Viz. Tab. 2.16.

- Varianta 0.1 – Vliv tepelných ztrát a ztrát ventilací na vnitřní teplotu.
- Varianta 0.2 – Potřeba tepla na vytápění ($T_{ai}=20^{\circ}\text{C}$) se zahrnutím zdroje č.2
- Varianta 1.1 – Vliv solárního záření skrz okenní výplně na vnitřní teplotu
- Varianta 2.1 – Imaginární obydlí budovy osobami a tepelný zisk z vybavení (dle kap. 2.3.2.2).
- Varianta 3.1 - Provoz topné rohože v akumulční podlaze napájené z fotovoltaických panelů. (Tzv. Ostrovní režim – „off-grid“)
- Varianta 4.1 – Doplnění nspecifikovaného zdroje tepla pro udržení teploty $T_{ai}=20^{\circ}\text{C}$ v otopném období. (v případě použití konvenčních zdrojů energie tzv. „on-grid“)

Tab. 2.16 Varianty tepelných toků pro posouzení bilance budovy

REF/PCM	Tepelná ztráta prostupem	Tepelná ztráta větráním	Solární zisky	Vnitřní zisky	Topná rohož Zdroj č.1	Doplňkový zdroj č.2
Varianta 0.1	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)	(-)
Varianta 0.2	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)	ANO
Varianta 1	ANO	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)
Varianta 2	ANO	ANO	ANO	ANO	(-)	(-)
Varianta 3	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	(-)
Varianta 4	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Všechny varianty jsou vypočteny jak pro případ akumulční podlahy s betonem referenčním, tak i pro beton s PCM. Výsledky jsou dále porovnávány z hlediska celkových potřeb tepla na vytápění a potřeb jednotlivých energetických toků do budovy.

K porovnání vlivu samotné akumulční vrstvy na celkové potřeby tepla a teplot v interiéru byla vyhotovena varianta podlahy s referenčním betonem o tloušťce akumulční vrstvy 5cm.

Pro analýzu potřeby tepla na vytápění slouží varianta 0.2. Při této variantě do modelu budovy nevstupují žádné vnější ani vnitřní zisky ovlivňující pozitivně teplotu v prostoru. Je ponechán zapnutý pouze systém větrání se ZZT, a dále funguje přenos tepla vedením skrz konstrukci budovy.

Pro zajištění vnitřní návrhové teploty 20°C je využito zdroje tepla č.2 popsaného v kapitole 2.3.3.2. Integrací aktuálního výkonu zdroje během simulace jsme dále schopni vypočítat měsíční potřeby energie nutné na vytopení.

2.3.5 Teplotní vyhodnocení přínosů akumulční podlahy

2.3.5.1 Teplota vnitřního uzlu – realita vs. výpočet

Zkoumání teplotního chování daného prostoru (zde teploty vnitřního uzlu T_{ai}) je nutné posoudit zejména z hlediska tepelného komfortu, který by takový prostor poskytoval svým uživatelům. Z teorie vnitřního prostředí jsou určujícími parametry pro komfortní bydlení teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu a případně koncentrace plynů.

Výsledky teplotního vyhodnocení spočívají ve značném zjednodušení dynamiky vzduchu. Jeden teplotní uzel pro celou budovu nedokáže zachytit některé jevy, které se v reálné budově dějí.

Vlivem chladného sálání se pocitová teplota v prostoru může jevit nižší jak teplota naměřená. V případě moderních novostaveb je ovšem tento jev částečně eliminován vyšší teplotou povrchu konstrukcí vzhledem k dobré tepelné izolaci obálky budovy.

Rozdílná hustota vzduchu také zapříčiňuje teplotní stratifikaci vzduchu po výšce místnosti. Při jednouzlovém modelu nejsme schopni tento jev postihnout a tudíž výsledná teplota vzešlá ze simulací je teplota spíše průměrná v celém objemu budovy.

2.3.5.2 Vyhodnocení

Pro účely posouzení vlivu akumulční podlahy a její modifikace pomocí látek s fázovou přeměnou na vlastní tepelnou stabilitu vnitřního prostředí bylo využito dat založených na výpočtech jednotlivých variant tepelných toků dle kap. 2.3.4. Na základě těchto měření byli zjištěny průběhy teplot vnitřního uzlu jednotlivých variant v půlhodinovém kroku.

Vyhodnocení těchto dat proběhlo na měsíčních průměrech z naměřených hodnot a na základě četnosti zastoupení daných teplot v určitém intervalu. Pro tato vyhodnocení byl využit program Microsoft Excel.

Pro vyhodnocení četnosti teplot v daném intervalu byl zvolen teplotní interval vnitřního uzlu od 19°C do teploty 25°C. Tento interval teplot v případě uvažování teploty uzlu jako teploty operativní by odpovídal kategorii vnitřního prostředí dle ČSN EN ISO 7730 [6] typu C, a to při běžném oblečení a činnosti.

Z hlediska tepelné ochrany budov [3] je mezní hodnota v případě tepelného přehřívání stanovena teplota 27°C pro obytné místnosti. Tato teplota je ovšem hraniční, a nelze jí brát jako hodnotu doporučenou.

3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

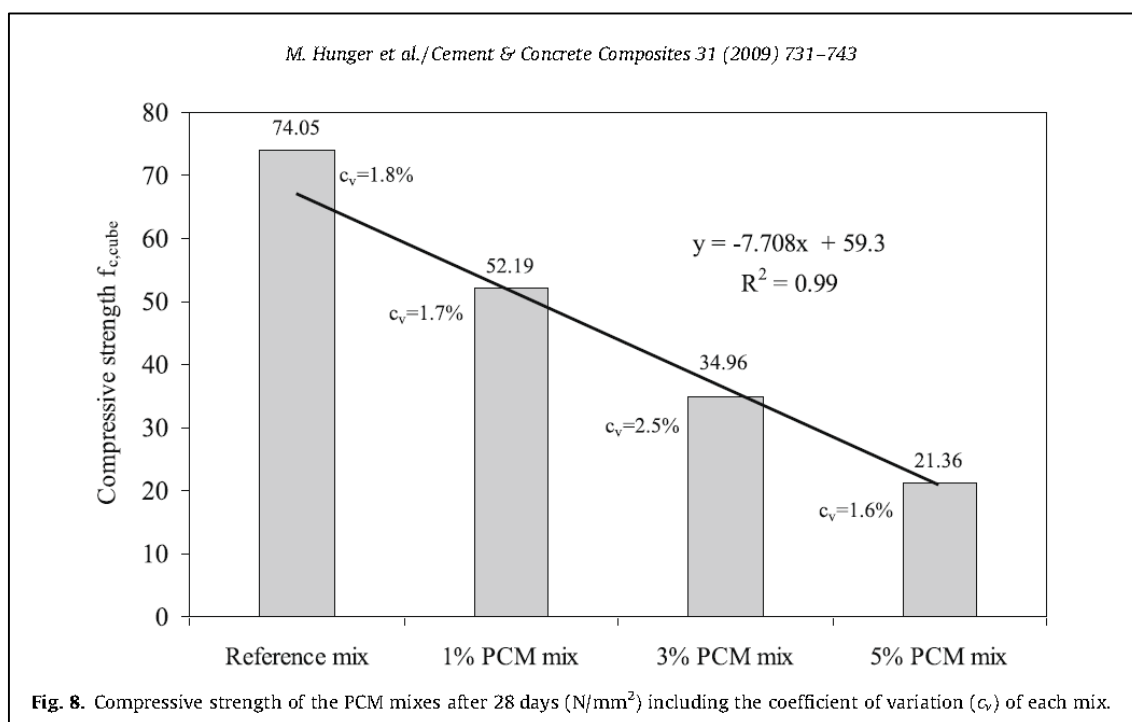
3.1 Měření vlastností betonové směsi

Vzorky betonů vyhotovené v laboratořích Experimentálního centra a v Univerzitním centru UCEEB byly dále podrobeny zkouškám ověřující jejich tepelně technické a mechanické vlastnosti. Toto ověření bylo velmi důležité pro následnou validaci výpočtového modelu.

První měření proběhlo na vzorcích č.1 vyhotovené v Univerzitním centru v Buštěhradě za účelem odhalení případných hrubých nedostatků ve vlastní navržené receptuře. Druhé měření proběhlo na vzorcích č.2 zejména za účelem určení skutečných tepelně technických vlastností pro následné vyhodnocení experimentálního modelu.

3.1.1 Měření pevnosti v tlaku a tahu za ohybu

Dle [13] je velkou slabinou ve využití PCM v betonových či jiných směsích pokles pevnostních charakteristik. Na Obr. 3.1 lze vidět vliv klesající pevnosti v tahu za ohybu, a to na vzorcích, kde dochází k postupnému zvyšování podílů PCM ve směsi od 0%hm. množství až do hodnoty 5%.



Obr. 3.1 Vliv PCM na změny mechanických vlastností (Hunger, 2009) [13]

Pro účely měření byly zhotoveny celkem 4 druhy směsí u vzorků č. 1, přičemž hm. množství PCM přibližně odpovídá směsím vyhotovených v [13]. U vzorků č.2 vzhledem k předchozímu vyhodnocení vzorků č.1 byla vytvořena pouze referenční směs spolu se směsí o 4% hm. množství PCM.

Po vytvrdnutí jednotlivých trámů proběhlo testování mechanických vlastností v laboratořích experimentálního centra na Fakultě stavební. Nejdříve byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu, přičemž na již otestovaném zlomeném vzorku byla následně provedena zkouška pevnosti v tlaku. (viz. Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Měření mechanických vlastností v Experimentálním centru ČVUT

Po odečtení hodnot max. silového zatížení byl proveden přepočít na výsledné pevnosti vzorků. Výpočet byl proveden dle ČSN EN 13892- 2 [7] Výsledky jsou uvedeny v Tab. 1.1.

Tab. 3.1 Podrobné výsledky měření mechanických vlastností vzorků č.1 a č.2

Směs	d1 (mm)	d2 (mm)	m (g)	F - Tah (kN)	F - Tlak (kN)	ρ (kg/m ³)	f_{ctm} (Mpa)	f_{ck} (Mpa)
Vzorky č. 1 - Buštěhrad								
Referenční - 1	99,6	100	8639	10,8	261	2168	3,3	26,1
Referenční - 2	105	100	8550	10,6	266	2036	3,0	26,6
Referenční - 3	98,5	100	8470	8,7	246	2150	2,6	24,6
PCM 2% - 1	89,9	100	8040	9,7	178	2236	3,2	17,8
PCM 2% - 2	98,6	100	8024	9,1	182	2034	2,8	18,2
PCM 2% - 3	99	100	8174	9,6	185	2064	2,9	18,5
PCM 3% - 1	98,9	100	7998	9,3	168	2022	2,8	16,8
PCM 3% - 2	98	100	7868	9,8	168	2007	3,0	16,8
PCM 3% - 3	97,9	100	7833	9,8	170	2000	3,0	17,0
PCM 4% - 1	99,1	100	7740	8,7	155	1952	2,6	15,5
PCM 4% - 2	98,3	100	7722	7,4	160	1964	2,3	16,0
PCM 4% - 3	99,7	100	7758	9	170	1945	2,7	17,0
Vzorky č. 2 - Experimentální centrum								
Referenční - 1	99,89	100	8553,15	8,71	??	2141	2,6	31,9
Referenční - 2	99,07	100	8566,3	10,1	??	2162	3,1	31,1
Referenční - 3	94,22	100	8022,1	8,92	??	2129	2,8	32,6
PCM 4% - 1	99,37	100	8045,7	5,33	??	2024	1,6	16,4
PCM 4% - 2	99,87	100	7972,15	6,12	??	1996	1,8	17,1
PCM 4% - 3	101,28	100	7908,25	5,96	??	1952	1,8	15,9

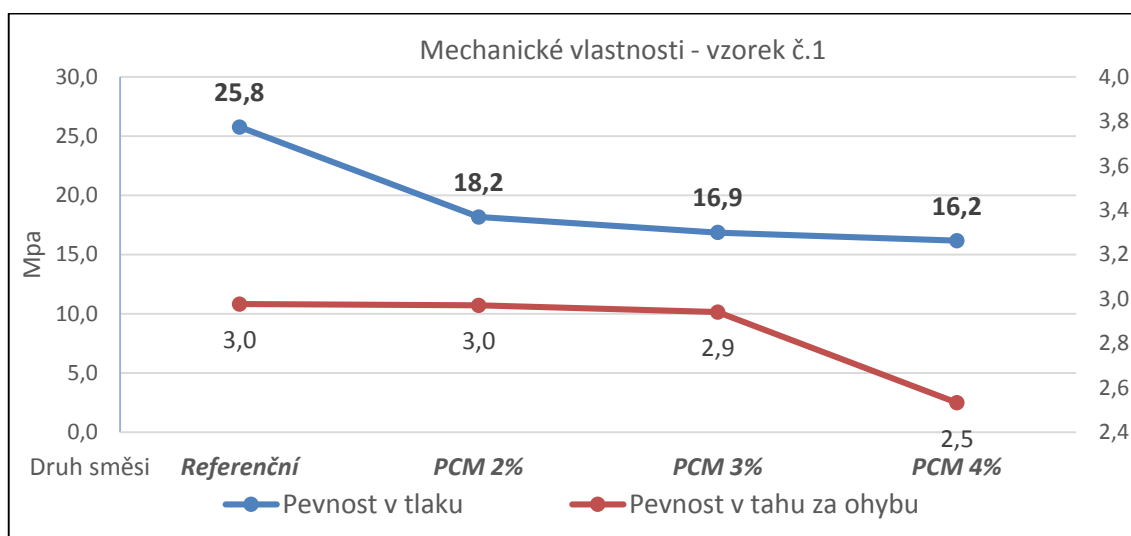
Pro lepší interpretaci výsledků bylo provedeno zprůměrování hodnot, ovšem s vynecháním vzorků č. 4 (PCM 2% - 1) a 11 (PCM 4% - 2) u vzorků č.1, u kterých se výsledky výrazně liší od průměru, a je zde tedy předpoklad, že došlo buď k chybě měření, nebo byli vzorky ovlivněny již při vlastní přípravě forem. Výsledné hodnoty shrnuty v Tab. 3.1.

Chybějící hodnoty max. zatížení, v případě zkoušky pevnosti v tlaku na vzorcích č.2 jsou zapříčiněny jejich smazáním z databáze po vyhodnocení naměřených dat. Výsledné pevnosti v tlaku jsou založené na původních naměřených hodnotách.

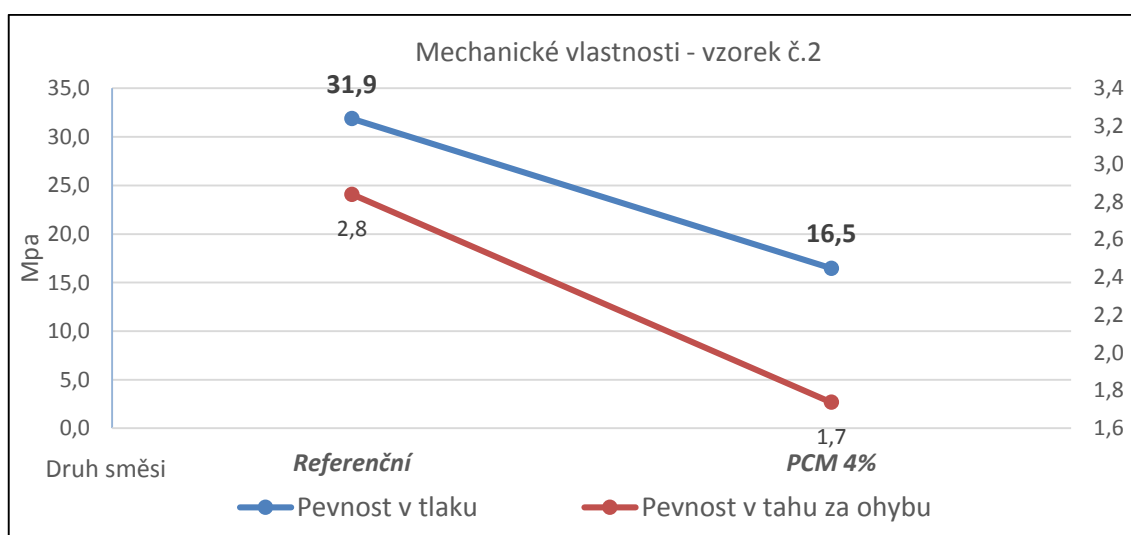
Pro lepší přehled jsou v Tab. 3.2 shrnuty průměry z naměřených hodnot. Na Graf. 3.1 a Graf. 3.2 jsou vyneseny průměrné hodnoty pevností v tlaku a tahu za ohybu, na nichž je zřetelně vidět vliv PCM na klesající pevnosti obou posuzovaných hodnot.

Tab. 3.2 Shrnutí z měření mechanických vlastností vzorků č.1 a č.2

Směs	$f_{ctm} - \text{min}$	$f_{ctm} - \text{průměr}$	$f_{ctm} - \text{medián}$	f_{ck}	Obj. hmotnost
Vzorky č.1 - Buštěhrad					
Referenční vz.1	2,6	3,0	3,0	25,8	2118
PCM 2% vz.1	2,8	3,0	2,9	18,2	2111
PCM 3% vz.1	2,8	2,9	3,0	16,9	2010
PCM 4% vz.1	2,3	2,5	2,6	16,2	1954
Vzorky č.2 - experimentální centrum					
Referenční vz.2	2,6	2,8	2,8	31,9	2144
PCM 4% vz.2	1,6	1,7	1,8	16,5	1991



Graf. 3.1 Mechanické vlastnosti vzorků č.1



Graf. 3.2 Mechanické vlastnosti vzorků č.2

3.1.2 Měření tepelně-technických vlastností

Zároveň s přípravou vzorků na měření mechanických vlastností byli zhotoveny vzorky na testování tepelně technických vlastností. Vzorky 300x300x60mm.

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. ,měření bylo provedeno v případě první sady (vzorky č.1) z obou stran testovací dlaždice. U druhé sady (vzorky č.1) již pouze na hladké spodní straně.

Vzhledem k nečekaným problémům s přístrojem HFM 300 určeným pro měření tepelné vodivosti za předem definovatelných teplot bylo měření provedeno pouze přístrojem ISOMET 2104.

Tab. 3.3 Tepelně technické vlastnosti – celkový souhrn vzorků č.1 a č.2

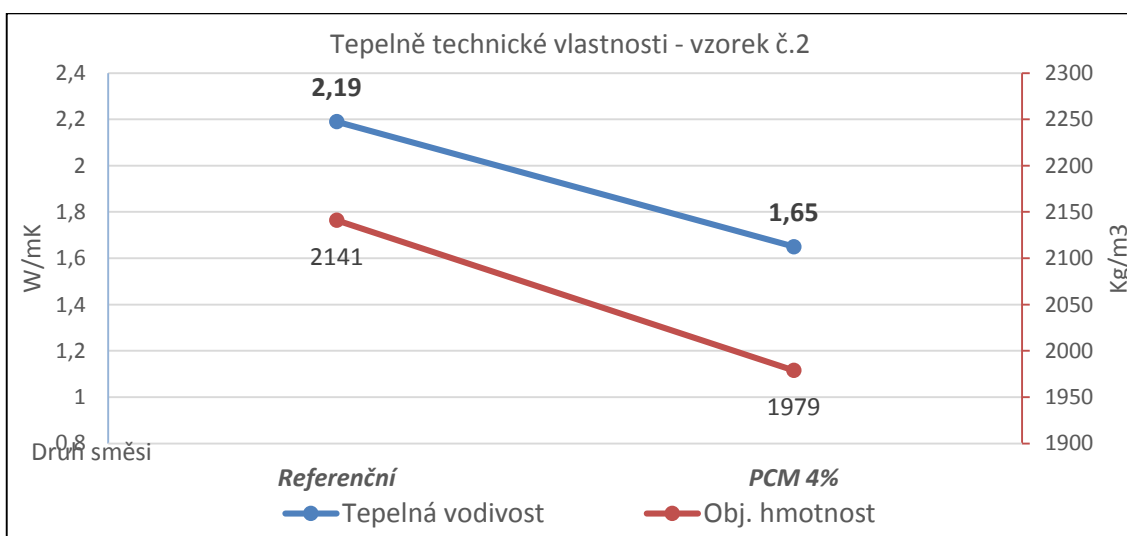
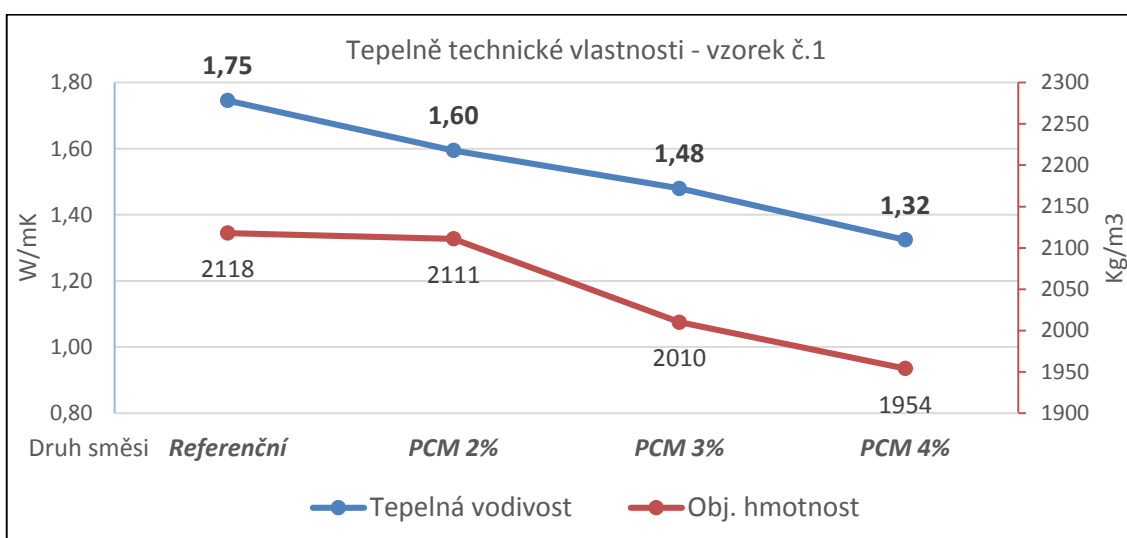
Druh směsi	Tepelná vodivost	Obj. tep. kapacita	Teplotní vodivost	Obj. hmotnost	Tepelná kapacita
	W/(m.K)	J/(m ³ .K)	m ² /s	kg/m ³	J/kg.K
Vzorky č.1 - Buštěhrad					
Beton REF 0% hrubá	1,345	1,396	0,964	2118	659,1
Beton REF 0% hladká	1,637	1,713	0,956	2118	808,8
Beton REF 0% hladká	1,855	1,775	1,045	2118	838,1
Beton REF 0% hladká	1,57	1,687	0,9308	2118	796,5
Beton PCM 2% hrubá	1,243	1,447	0,859	2111	685,5
Beton PCM 2% hladká	1,595	1,82	0,876	2111	862,2
Beton PCM 3% hrubá	1,192	1,449	0,823	2010	720,9
Beton PCM 3% hrubá	1,1722	1,5078	0,7774	2010	750,1
Beton PCM 3% hladká	1,499	1,648	0,909	2010	819,9
Beton PCM 3% hladká	1,4702	1,6343	0,8996	2010	813,1
Beton PCM 3% hladká	1,4712	1,7935	0,8203	2010	892,3
Beton PCM 4% hrubá	1,046	1,539	0,68	1954	787,6
Beton PCM 4% hrubá	1,008	1,4372	0,7014	1954	735,5
Beton PCM 4% hrubá	1,0528	1,4653	0,7185	1954	749,9
Beton PCM 4% hladká	1,385	1,784	0,776	1954	913,0
Beton PCM 4% hladká	1,2956	1,8018	0,719	1954	922,1
Beton PCM 4% hladká	1,2933	1,8146	0,7127	1954	928,7
Vzorky č.1 - Experimentální centrum					
Beton REF 0% hladká	2,246	1,9156	1,1725	2141	894,7
Beton REF 0% hladká	2,189	1,8137	1,2069	2141	847,1
Beton REF 0% hladká	2,1332	1,7102	1,2473	2141	798,8
Beton PCM 4% hladká	1,691	1,7897	0,9449	1979	904,3
Beton PCM 4% hladká	1,622	1,5886	1,0212	1979	802,7
Beton PCM 4% hladká	1,637	1,624	1,0082	1979	820,6

V souhrnu Tab. 3.4 jsou tučně zvýrazněny hodnoty, které jsou součástí výpočetního modelu. Respektive na jejichž základě byli tyto hodnoty určeny.

Z hodnot zjištěných při měření byla sestavena Tab. 3.4. ve které jsou průměry naměřených hodnot a rozděleny dle toho, na které straně vzorku bylo provedeno měření.

Tab. 3.4 Souhrn tepelně technických vlastností vzorků č.1 a č.2

Druh směsi	počet měření	Objemová hmotnost	Tepelná vodivost	Tepelná kapacita	Teplotní vodivost
	-	Kg/m ³	W/(m.K)	J/kg.K	m ² /s
Vzorky č.1 - Buštěhrad					
Vz. Ref - hrubá strana	1	2118	1,35	659,1	0,96
Vz. Ref - hladká strana	2	2118	1,75	823,4	1,00
Vz. PCM 2% - hrubá strana	1	2111	1,24	685,5	0,86
Vz. PCM 2% - hladká strana	1	2111	1,60	862,2	0,88
Vz. PCM 3% - hrubá strana	2	2010	1,18	735,5	0,80
Vz. PCM 3% - hladká strana	3	2010	1,48	841,8	0,88
Vz. PCM 4% - hrubá strana	3	1954	1,04	757,7	0,70
Vz. PCM 4% - hladká strana	3	1954	1,32	921,3	0,74
Vzorky č.2 - Experimentální centrum					
Vz. Ref - hladká strana	3	2141	2,19	847	1,81
Vz. PCM 4% - hladká strana	3	1979	1,65	843	1,67



3.2 Měření experimentálního modelu

Měření probíhalo během dne a noci v hale na Univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě. Díky možnostem měřicí techniky bylo možno naměřená data online prohlížet a stahovat z domova pouze za přístupu k internetu. V následující tabulce č. je uveden souhrn všech provedených měření s časy jejich realizace.

Druh měření	Začátek měření	Topení OFF	Konec měření
Ustálený stav 1	5.12.2016 13:20	6.12.2016 13:26	7.12.2016 16:45
Ustálený stav 2	14.12.2016 18:10	16.12.2016 7:00	17.12.2016 16:00
Dynamický stav 1	8.12.2016 10:40	8.12.2016 16:05	9.12.2016 11:40
Dynamický stav 2	13.12.2016 8:55	13.12.2016 16:09	14.12.2016 12:30

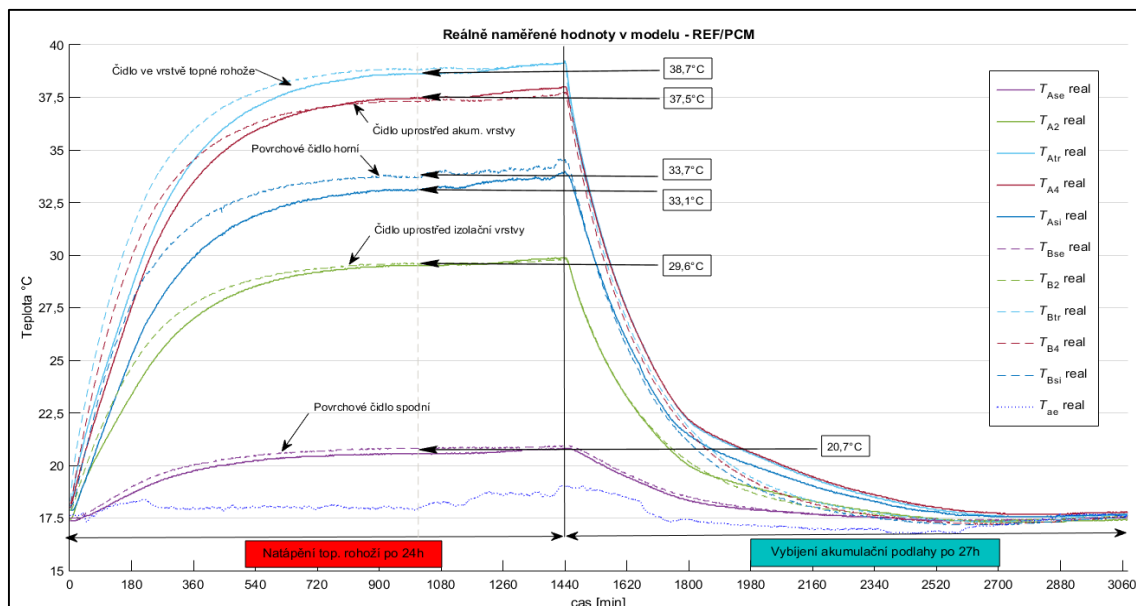
Vzhledem k tomu, že bylo potřeba modely mít v teplotě pod teplotou tání PCM, bylo umístění v hale tím nejjednodušším řešením. V opačném případě by muselo dojít na využití klimatické komory, jejíž provoz je relativně nákladný, a bylo by měření nutné provést v co nejkratším termínu.

Teplota haly se v době měření pohybovala většinu času kolem 16 °C až 17 °C.

Bohužel je ovšem prostor haly využíván na další experimenty, a je zde tedy také zvýšený pohyb osob a jejich aktivit. Během probíhajícího měření ojediněle došlo k výraznému poklesu jinak stabilní vnitřní teploty vlivem otevření zejména nákladových vrat. Tyto výkyvy byli v případech, kdy to bylo možné, z naměřených dat vymazány tak, aby neovlivňovaly průběh výsledné simulace.

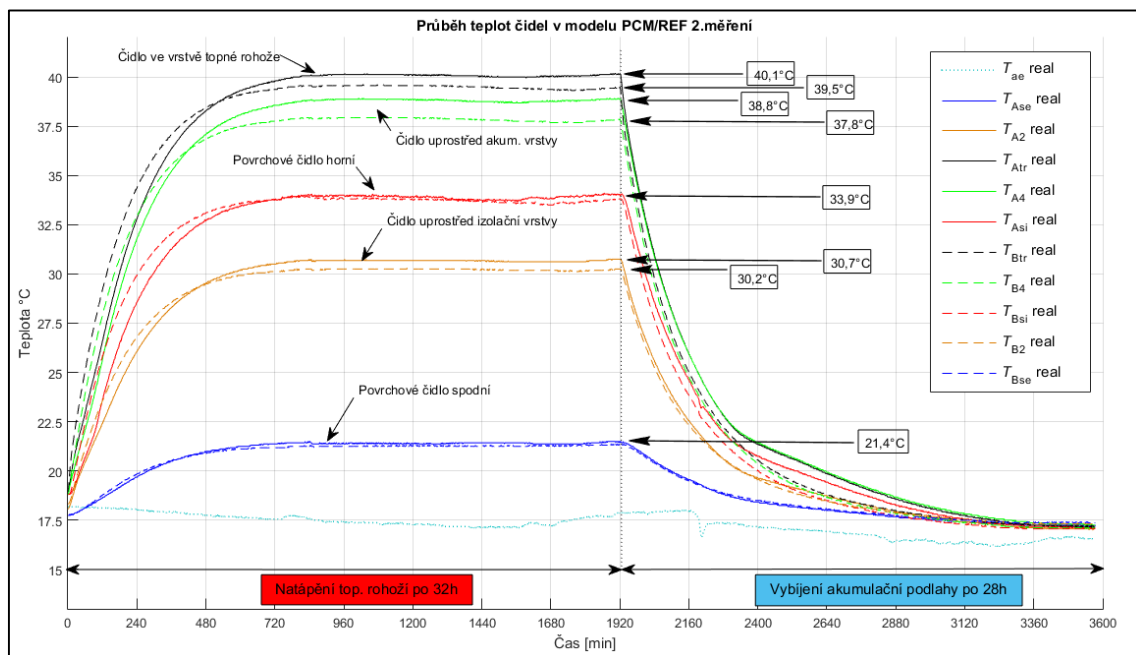
3.2.1 Experiment č.1 – Uvedení do ustáleného stavu při zapnutí topné rohoži

Při tomto měření bylo cílem uvést model podlahy do ustáleného stavu, a eliminovat vliv akumulční schopnosti jednotlivých vrstev pro lepší kontrolu tepelné vodivosti vzešlé z předchozích měření tepelně technických vlastností v kap. 3.1.. Celkem byli provedeny dvě měření na obou modelech. V případě prvního měření bylo nevhodně umístěné čidlo okolní teploty ovlivněno stoupající teplotou betonové vrstvy a tudíž jsou takto naměřená data nepoužitelná pro simulační výpočet. Viz. Graf. 3.3.



Graf. 3.3 Experiment č.1 – reálná data_ měření č.1

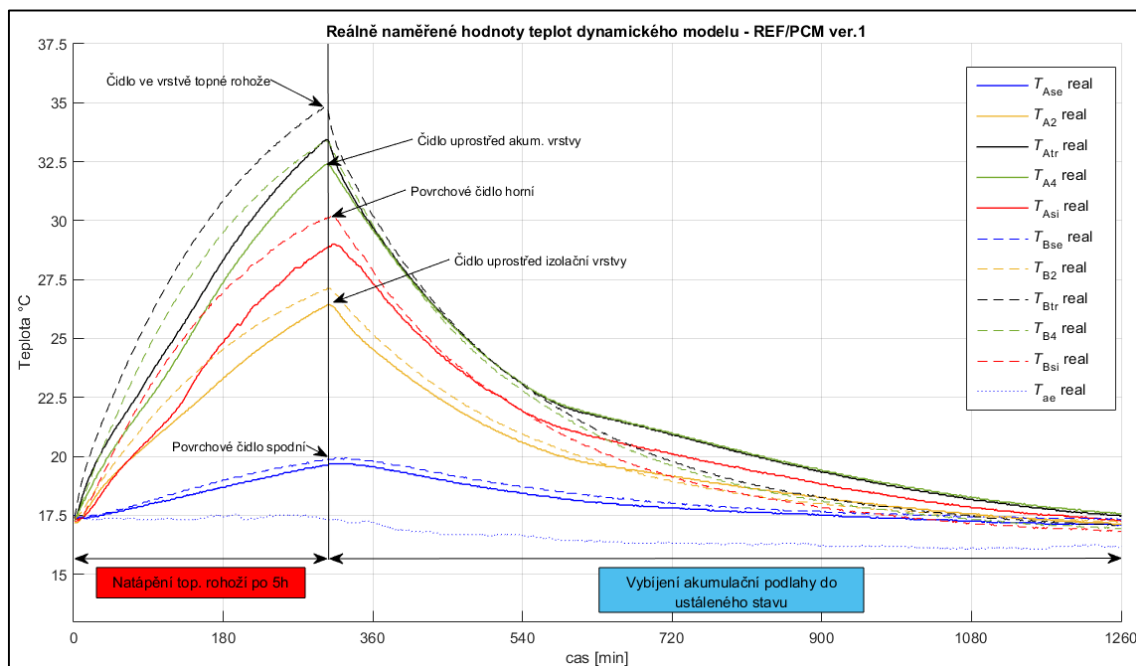
U druhého měření již bylo umístěno čidlo mimo vliv vlastního modelu a tudíž data takto získaná bylo možné použít pro validaci výpočtového modelu. Graf. 3.4.



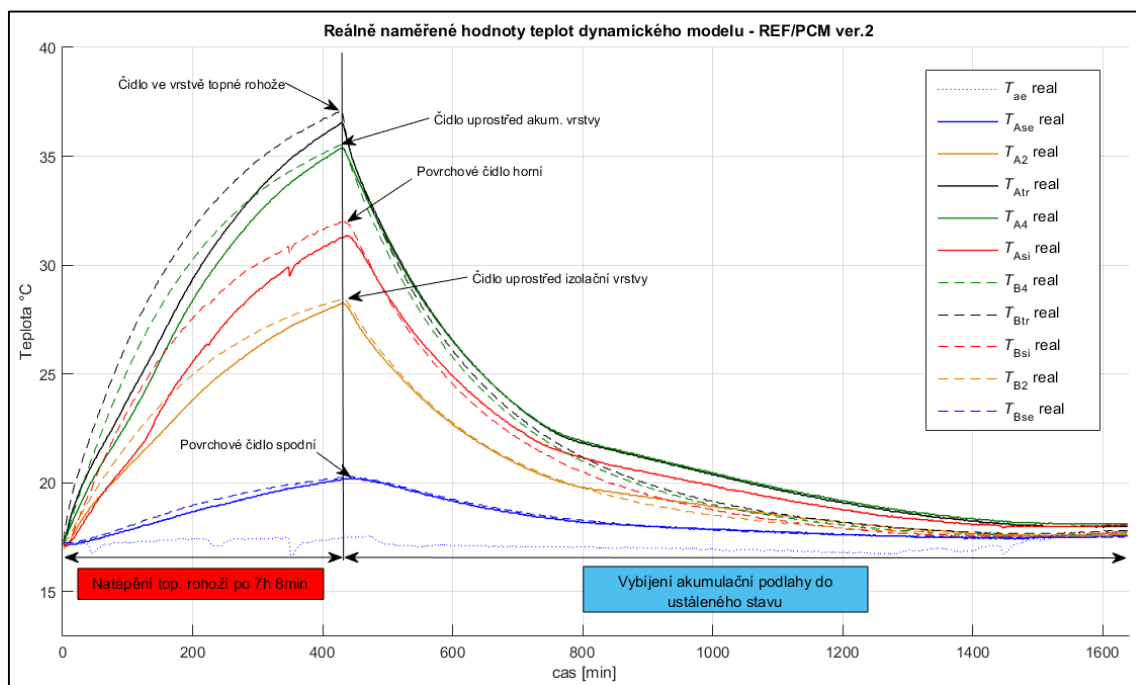
Graf. 3.4 Experiment č.1 – reálná data_ měření č.2

3.2.2 Experiment č.2 – Provozní natápění

Pro nasimulování teplotního chování modelu, který odpovídá představě reálného využití akumulční podlahy byla zvolena varianta, kdy byla topná rohož zapnuta po dobu cca 5 a 7 hodin, po kterou bylo bez přerušení dodáváno konstantní množství energie do modelu. Po této době byla topná rohož vypnuta, a model byl postupně uveden zpět do ustáleného stavu okolí.



Graf. 3.5 Experiment č.2 – reálná data_ měření č.1



Graf. 3.6 Experiment č.2 – reálná data_ měření č.2

3.3 Validace výpočtového modelu podlahy

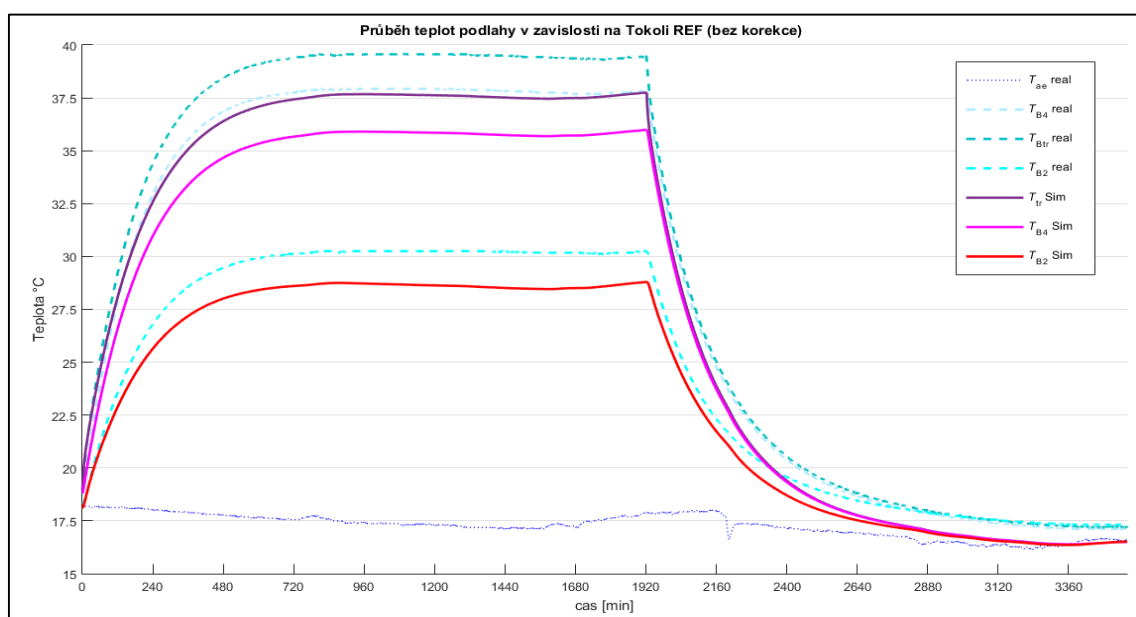
3.3.1 Model bez látek s fázovou přeměnou

Po prvotním nastavení modelu včetně počátečních podmínek a jednotlivých materiálových charakteristik byly na jejich základě provedeny simulace odpovídající jednotlivým experimentům dle kap.3.2. Dále je uveden výčet nejvýznamnějších úprav modelu, které byly na základě naměřených dat provedeny.

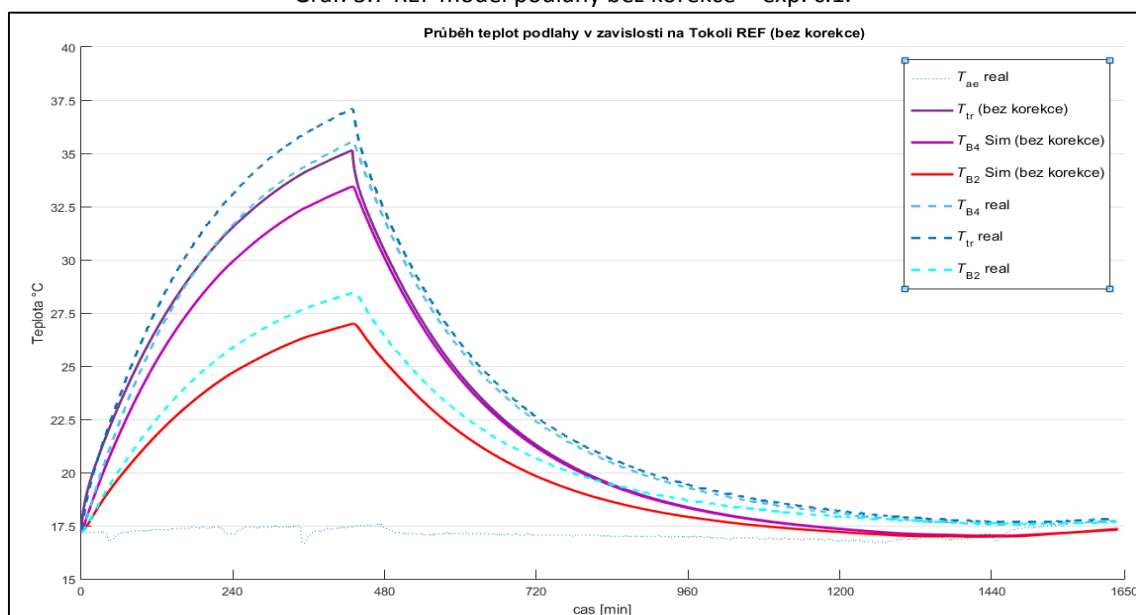
3.3.1.1 Simulace bez korekce naměřených dat

Na Graf. 3.7 a Graf. 3.8 je porovnání průběhu teplot z naměřených dat s modelem bez korekce.

- Součinitel přestupu tepla konstantní $\alpha_{si}=9,6\text{W/m}^2\text{K}$ ($R_{si} = 0,105\text{m}^2\text{K/W}$) bez vlivu sálání a bez závislosti na teplotě povrchu
- Teplota okolí bez korekce – dle reálných naměřených dat v prostoru



Graf. 3.7 REF model podlahy bez korekce – exp. č.1.

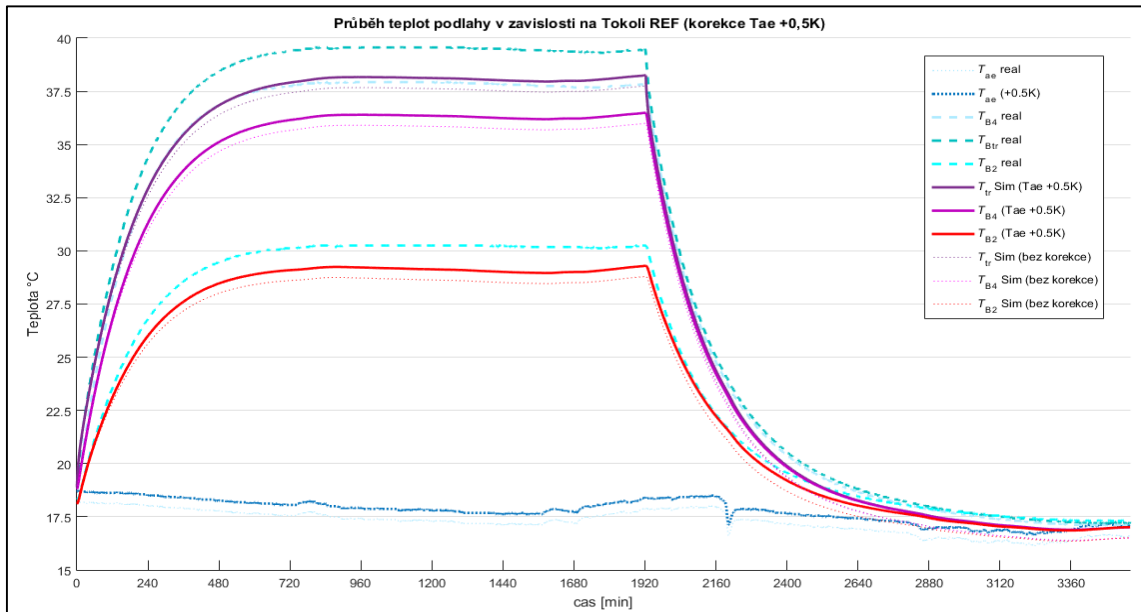


Graf. 3.8 REF model podlahy bez korekce – exp. č.2.

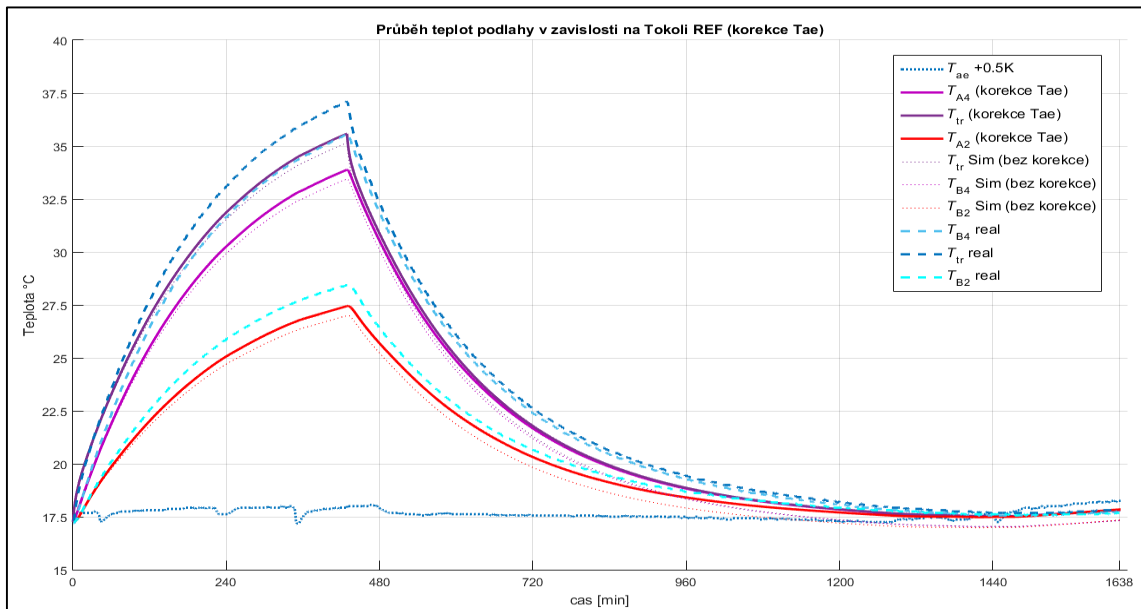
3.3.1.2 Korekce č.1 – úprava teploty okolí

Na Graf. 3.4. si lze povšimnout, že teplota okolí T_{ae} má nižší hodnotu, než data naměřená na modelu v ustáleném stavu na ke konci měření. Po ověření dalších dat byla provedena korekce chyby měření čidla okolní teploty o 0,5K tak, aby odpovídala teplotní hladině, na které jsou jednotlivé vrstvy modelu v ustáleném stavu. Viz. Graf. 3.9.

- Teplota okolí upravena oproti reálnému měření o +0,5K
- Součinitel přestupu tepla konstantní $\alpha_{si}=9,6\text{W/m}^2\text{K}$ ($R_{si} = 0,105\text{m}^2\text{K/W}$) bez vlivu sálání a bez závislosti na teplotě povrchu a okolí



Graf. 3.9 REF model podlahy s korekcí T_{ae} – exp. č.1.



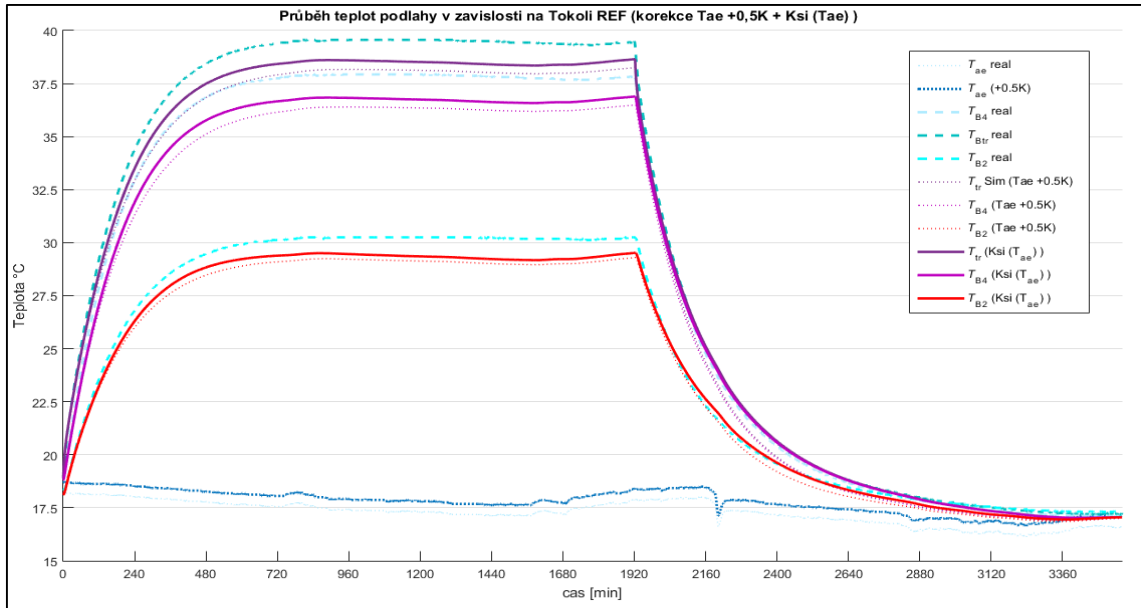
Graf. 3.10 REF model podlahy s korekcí T_{ae} – exp. č.2.

3.3.1.3 Korekce č.2 – úprava okolní teploty a proměnného součinitele přestupu α_{si}

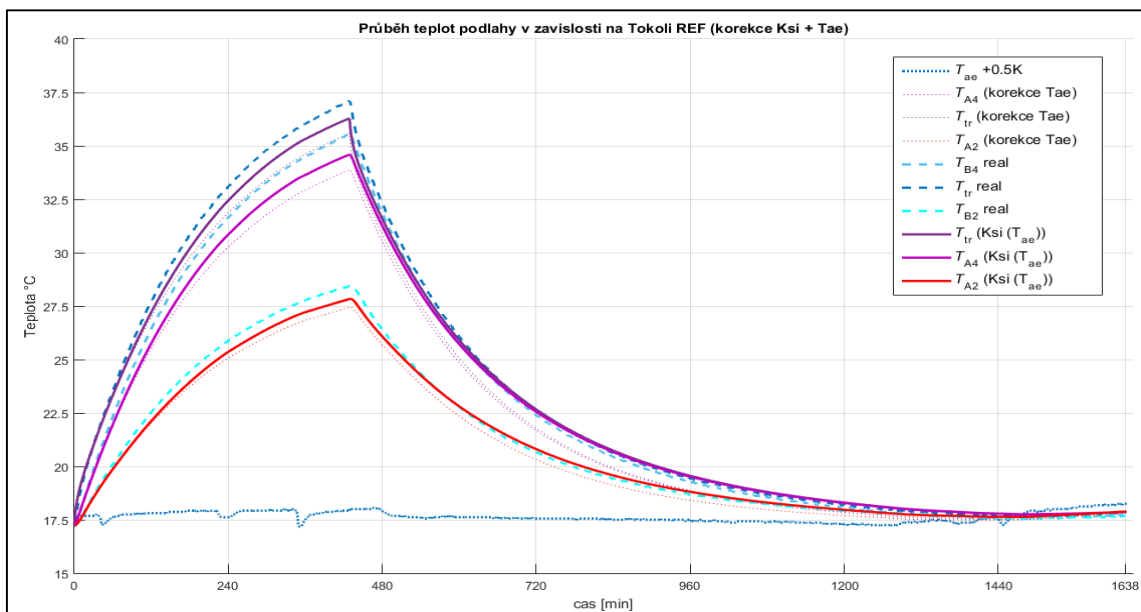
Vzhledem k tomu, že je posuzován model podlahového vytápění, hraje zde významnou roli změna teploty povrchu (cca 5K – 10K) oproti teplotě vzduchu nad povrchem, což má za následek vyvolání konvektivního proudu vzduchu nad touto plochou. Důsledkem je významné zvýšení přestupu tepla mezi konstrukcí podlahy a okolním prostředím.

Na Graf. 3.11 a Graf. 3.12 je znázorněn výsledný průběh teplot v modelu při zahrnutí vlivu proměnlivého součinitele přestupu tepla konvekcí a sáláním. Lze si povšimnout, že průběh teplot po této korekci odpovídá více hodnotám reálně naměřených.

- Teplota okolí upravena oproti reálnému měření o +0,5K
- Součinitel přestupu tepla α_{si} proměnný dle T_{ae} a T_{si} Viz.kap.2.2.1.3.



Graf. 3.11 REF model podlahy s korekcí α_{si} – experiment č.1.



Graf. 3.12 REF model podlahy s korekcí α_{si} – experiment č.2.

3.3.1.4 Výsledné odchylky modelu bez PCM s reálně naměřenými daty

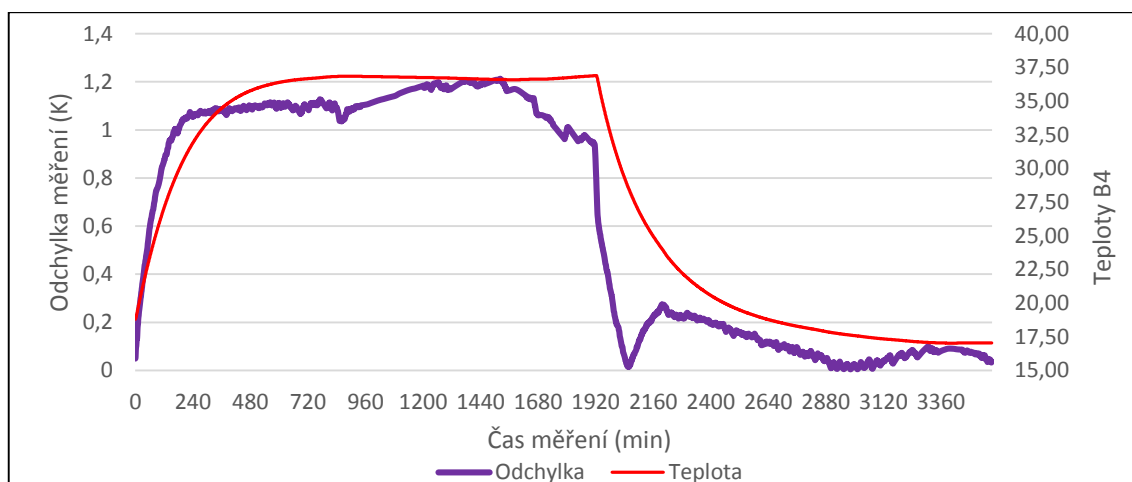
V Tab. 3.5. jsou vlivy jednotlivých korekcí (experiment č.1 – verze 2) shrnuty jako průměrné odchylky vypočítaných hodnot teplot ve vrstvě B4 (střed aku. vrstvy) od hodnot naměřených.

Tab. 3.5 Průměrné odchylky REF modelu – experiment č.1. v.2

Stav modelu	ČAS (min)	Úsek číslo	Bez korekce	Korekce T_{ae}	Korekce K_{si}
Náběh	0-300	1	1,41	1,18	0,83
Ustálení	300-1900	2	2,06	1,58	1,11
Chladnutí	1900-3600	3	0,90	0,40	0,12

Po zahrnutí jednotlivých korekcí do výpočetního modelu se průměrné odchylky v jednotlivých úsecích o 30% až 70%. podobný účinek nastane i v případě experimentu č.2 viz. Tab. 3.6.

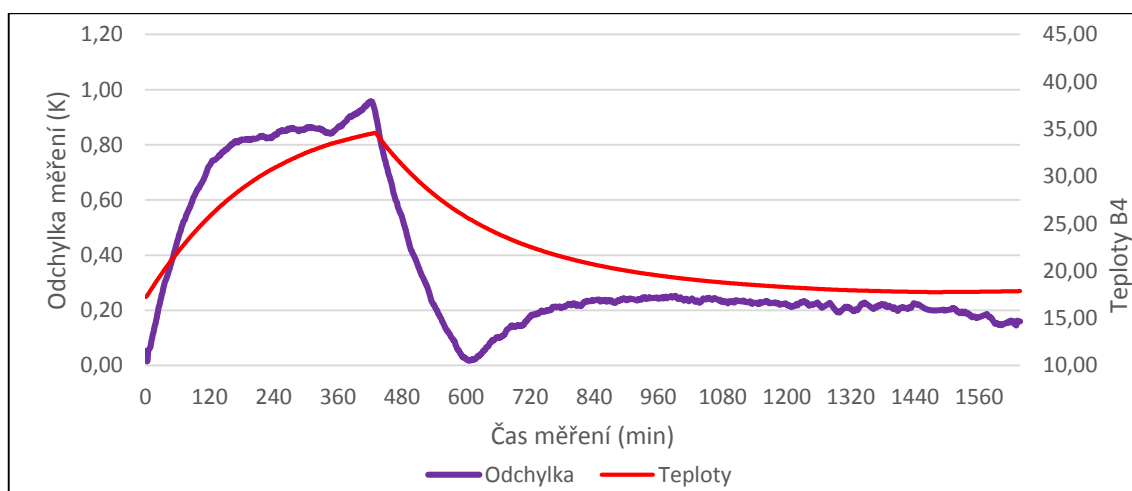
Pro lepší přehlednost je v Graf. 3.13 znázorněna maximální odchylka od reálně naměřených dat po zavedení součinitele přestupu tepla. Pro experiment č.2 v Graf. 3.14.



Graf. 3.13 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – REF exp. č.1

Tab. 3.6 Průměrné odchylky REF modelu – experiment č.2. v.2

Stav modelu	ČAS (min)	Úsek číslo	Bez korekce	Korekce T_{ae}	Korekce K_{si}
Náběh	0-430	1	1,47	1,19	0,73
Chladnutí	430-1450	2	1,02	0,53	0,24
Ustálení	1450-1640	3	0,46	0,05	0,18



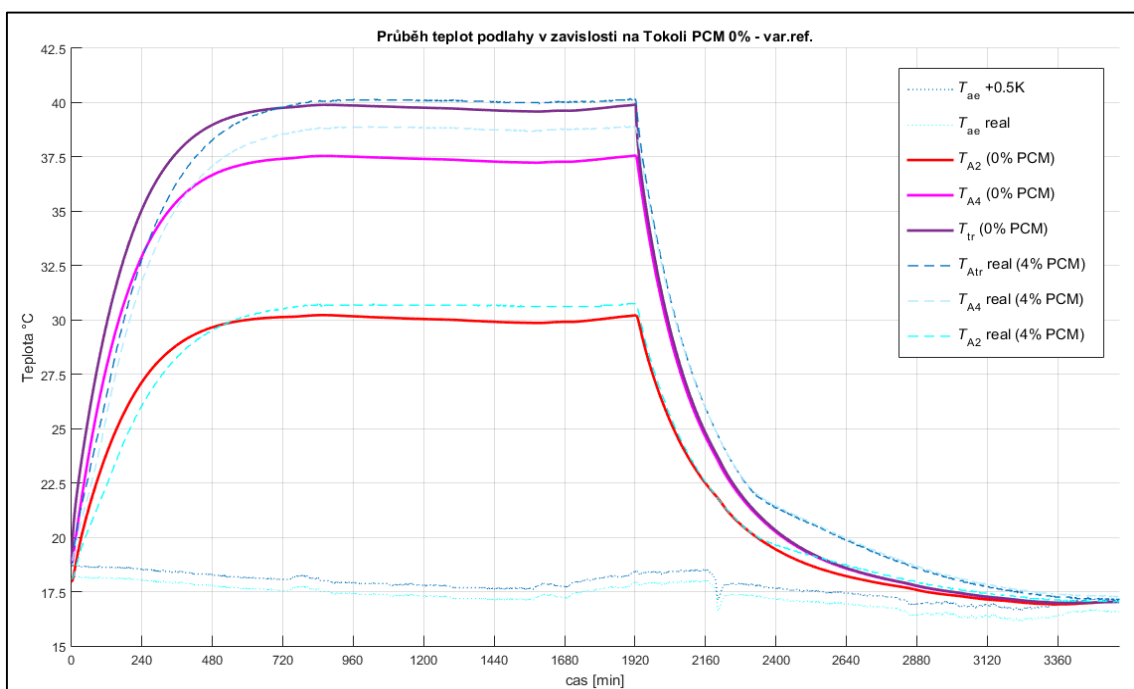
Graf. 3.14 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – REF exp. č.2

3.3.2 Model obsahující látky s fázovou přeměnou

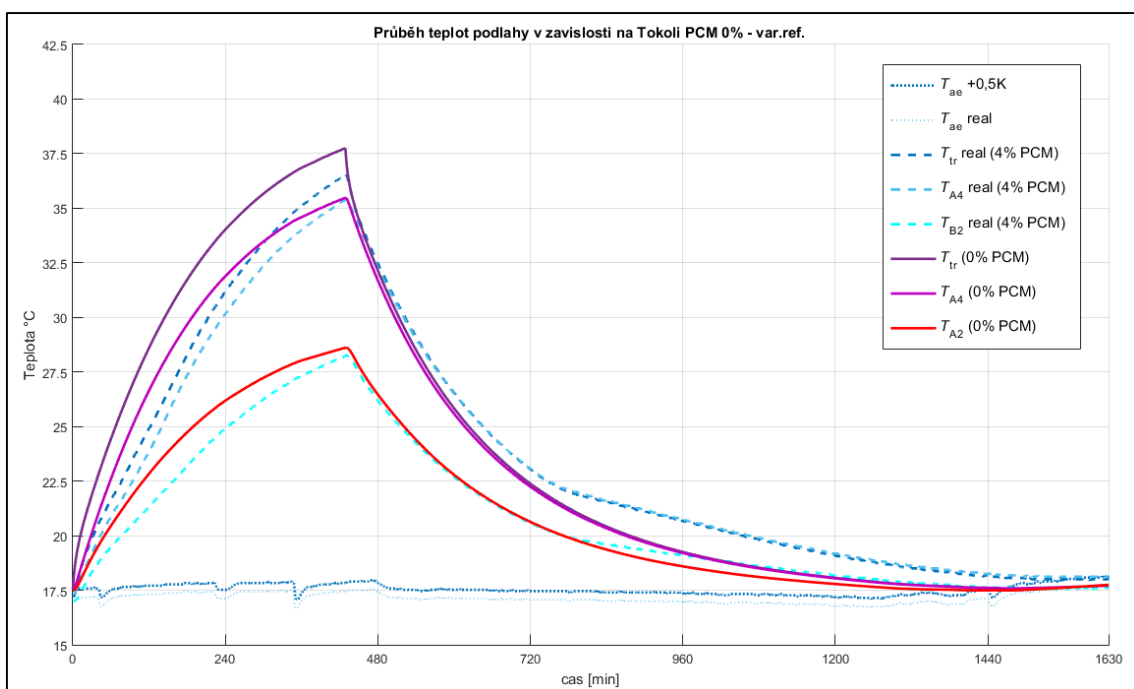
3.3.2.1 Simulace s korekcí naměřených dat bez vlivu PCM

Validace modelu obsahující látky využívající fázovou změnu je obtížná úloha. Pro účely této diplomové práce je ovšem jisté zjednodušení přijatelné.

Na Graf. 3.15 a Graf. 3.16 jsou znázorněny teplotní křivky reálně naměřených dat z modelu se 4% PCM a porovnány se simulací modelu s nastavením 0% PCM v betonu. Tepelně technické vlastnosti ovšem odpovídají témuž modelu dle kap. 3.1.2. Tímto je demonstrován vliv látek s fázovou přeměnou na teplotní chování betonu.



Graf. 3.15 PCM model podlahy bez korekce – experiment č.1



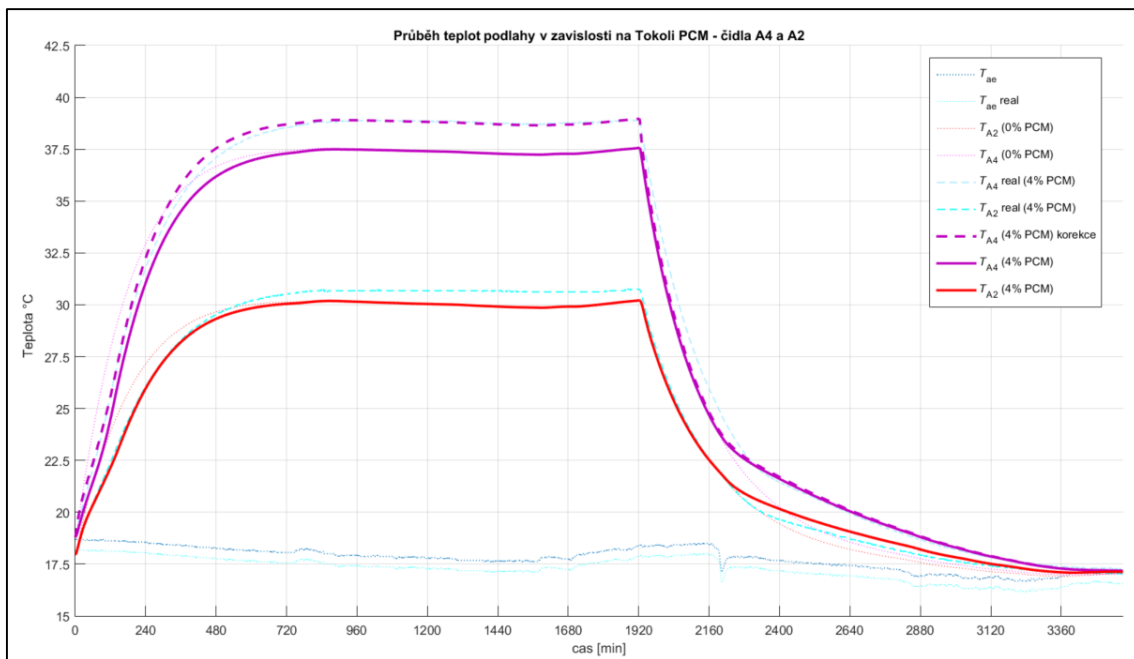
Graf. 3.16 PCM model podlahy bez korekce – experiment č.2

Výsledky této simulace poukazují na viditelný vliv přítomnosti látek s fázovou přeměnou. Lze si povšimnout, že kolem 22,5°C při chladnutí modelu dochází k výraznému „narovnání“ teplotní křivky vlivem stoupající tepelné kapacity při tuhnutí roztavených parafínů.

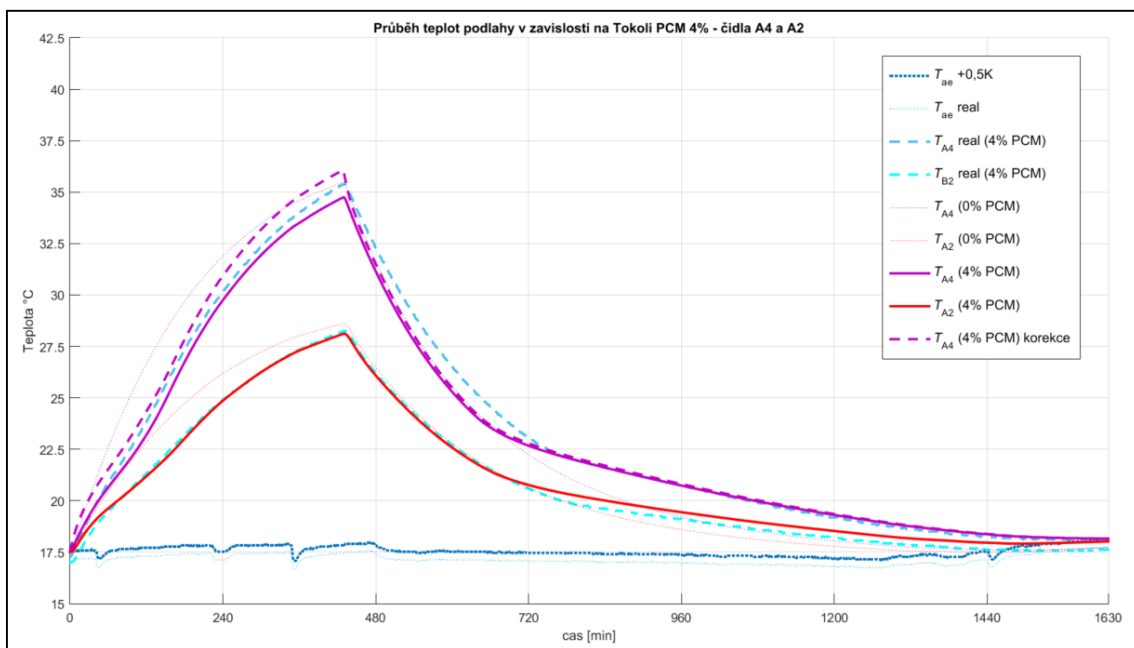
3.3.2.2 Korekce č.1 – vliv teploty tání PCM

V této korekci výpočtového modelu jsou již zahrnuty předešlé korekce z kap. 3.3.1., jelikož vliv těchto opatření je zcela totožný pro oba typy modelů.

Dle kap. 2.2.1.2. se pro simulaci tání a tuhnutí látek s fázovou přeměnou využívá zjednodušené závislosti tepelné kapacity na teplotě v jednotlivých vrstvách. Na Graf. 3.17 a Graf. 3.18 je uvažováno s „trojúhelníkovou“ závislostí při teplotách 17°C - 22°C - 24°C a hodnotou ve vrcholu 175 000J.



Graf. 3.17 PCM model podlahy s korekcí fázové přeměny – experiment č.1



Graf. 3.18 PCM model podlahy s korekcí fázové přeměny – experiment č.2

Vzhledem k pozorované výrazné odchylce ve výpočtových datech modelu s PCM se lze domnívat, že čidlo A4 při realizaci experimentálního modelu vlivem vibrování směsi pokleslo do nižší vrstvy (viz průběh křivky „T_{A4} – korekce“ na Graf. 3.17 a Graf. 3.18.), kde lze zaznamenat vyšší teplotu odpovídající jinému teplotnímu uzlu ve výpočtovém modelu.

Dále je nutno poznamenat, že integrací funkce vyjadřující vliv závislosti tepelné kapacity na teplotě v PCM nebylo dosaženo výrobcem deklarovaných 110kJ/kg látky nutné k celkové změně fáze. Pro odladění modelu bylo potřeba celkové množství energie zvýšit až na hodnotu kolem 612kJ/kg (prostřednictvím výšky „trojúhelníkové“ závislosti dle kap. 2.2.1.2).

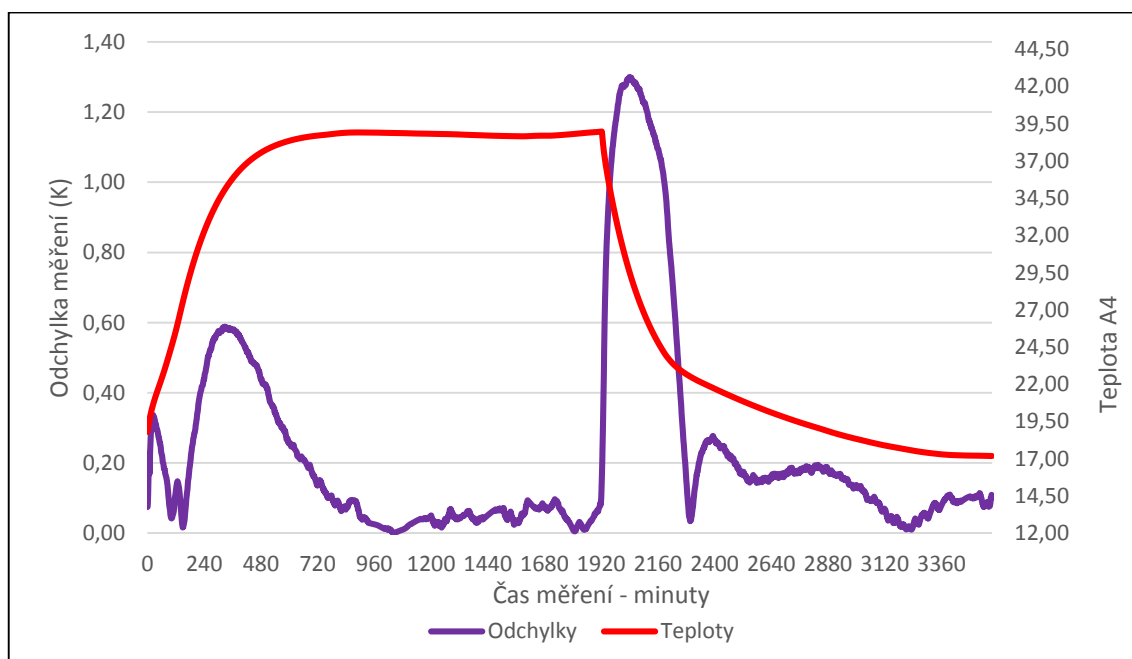
Chybou zde může být nedostatečné pochopení a následná implementace změny tepelné kapacity do modelu. Faktem ovšem je, že při stávajícím nastavení modelu došlo k výraznému zpřesnění simulace, a pro účely posouzení vlivu na model fiktivního domu je tedy tato úprava přijatelná i přes nejasnosti s jejím zadáním.

3.3.2.3 Výsledné odchylky modelu s PCM od reálně naměřených dat

Vliv jednotlivých korekcí je vyjádřen na Graf. 3.19. pro experiment č.1 modelu s látkami s fázovou přeměnou. Na Graf. 3.20. je dále zobrazen ten samý model při experimentu č.2. Průměrné odchylky jsou dále shrnuty po jednotlivých úsecích v Tab. 3.7 a v Tab. 3.8

Na jednotlivých grafech je patrné, že největší odchylky model dosahuje při vyšších teplotách akumulární hmoty v kapalné fázi obsažených látek PCM. Po ustálení ovšem dojde znovu k poklesu. Toto chování výpočtového modelu je částečně dáno nastavením, kdy se změnou počátku a konce teploty tání dosáhlo vyšší přesnosti zejména v počátcích změny fáze PCM v betonu. Při odlišném nastavení se docílilo pouze opačného efektu, kdy největších odchylek bylo dosaženo zejména v počátcích při náběhu teploty a poté odchylka postupně klesala.

Vzhledem k povaze modelu, kdy se akumulární podlaha bude pohybovat spíše ve fázi tání a tuhnutí, a nebude se dostávat do ustáleného stavu, bylo ponecháno toto nastavení modelu pro jeho užité vlastnosti ve vztahu k výpočtovému modelu objektu.

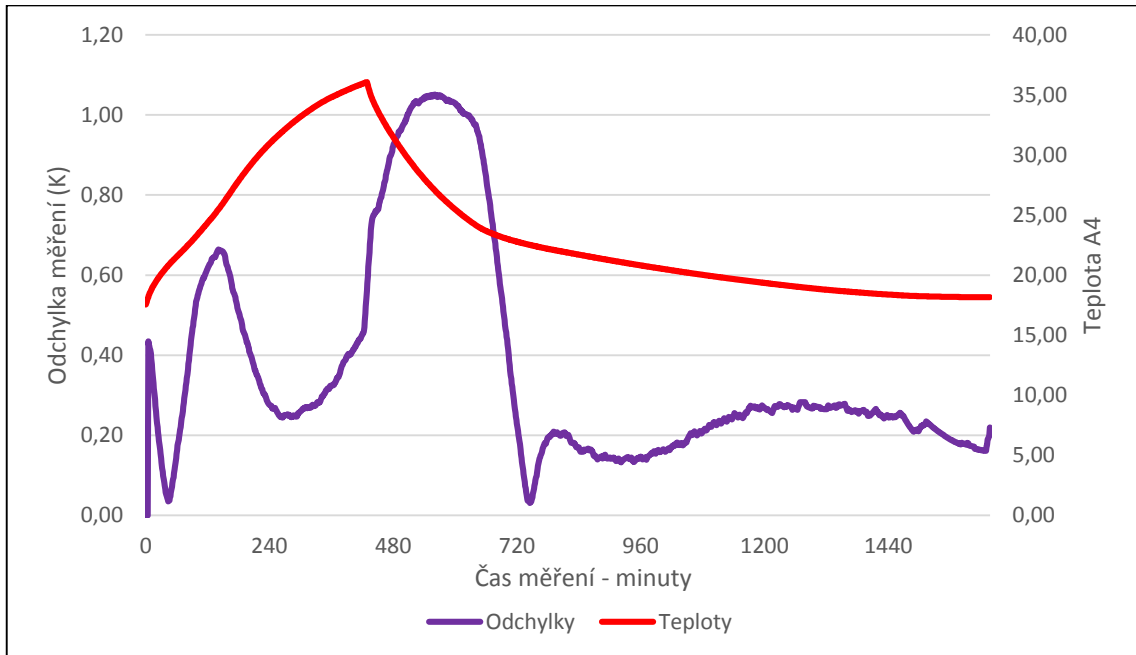


Graf. 3.19 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – PCM exp. č.1

Tab. 3.7 Průměrné odchyly PCM modelu – experiment č.1. v.2

Stav modelu	ČAS (min)	Úsek číslo	Bez korekce	Korekce C_{pcm}
Náběh	0-300	1	1,43	0,27
Ustálení	300-1900	2	1,20	0,14
Chladnutí	1900-3600	3	0,95	0,32

Pro experiment č.2 odpovídá velikost odchyly na Graf. 3.20. místu ve stejné fázi procesu tání a tuhnutí jako na Graf. 3.19.



Graf. 3.20 Odchylyka výpočtového modelu od exp. modelu – PCM exp. č.2

Vliv korekce změny tepelné kapacity v závislosti na teplotě na průměrné odchyly jsou uvedeny v Tab. 3.7 pro experiment č.1 a v Tab. 3.8. pro experiment č.2.

Zpřesnění výsledků při posouzení průměrné odchyly na stejném intervalu před a po zahrnutí korekce více jak 50%.

Tab. 3.8 Průměrné odchyly PCM modelu – experiment č.2. v.2

Stav modelu	ČAS (min)	Úsek číslo	Bez korekce	Korekce C_{pcm}
Náběh	0-430	1	1,66	0,37
Chladnutí	430-1450	2	0,90	0,40
Ustálení	1450-1640	3	0,50	0,20

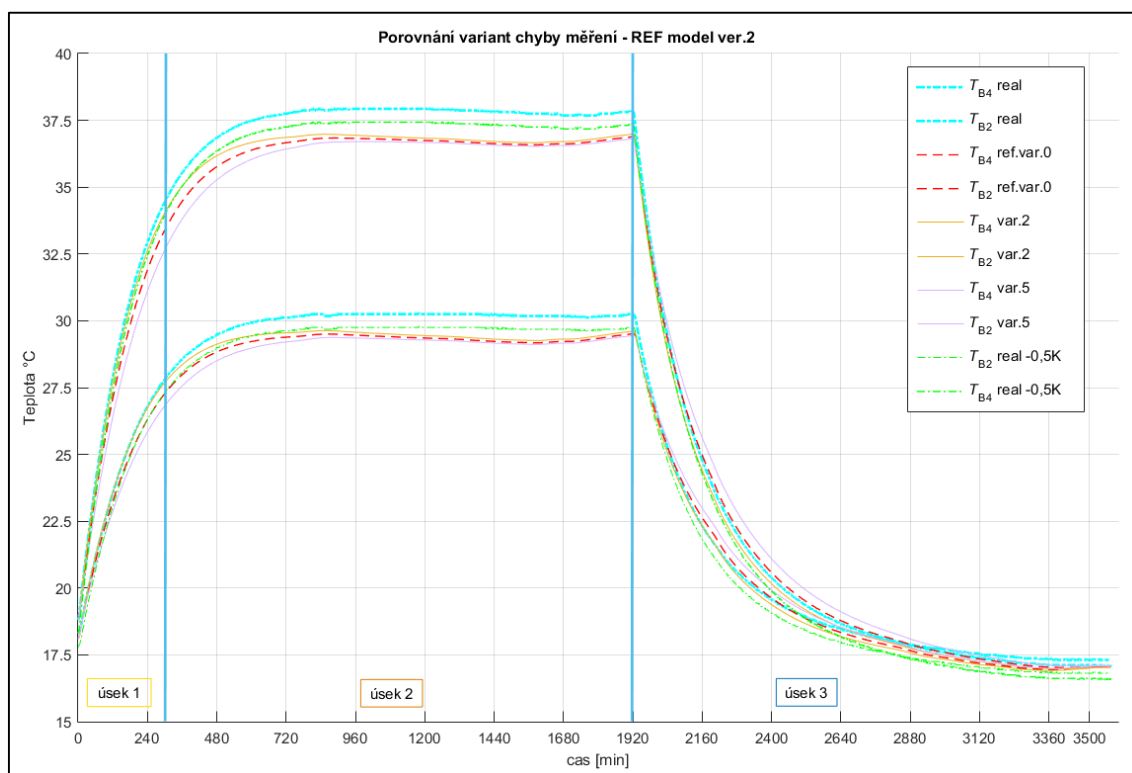
3.3.3 Posouzení nejistoty měření při validaci modelu

Vzhledem k nepřesnostem měřicí techniky lze předpokládat, že uvažované materiálové charakteristiky použité pro výpočet neodpovídají reálnému modelu. Z udávaných hodnot nepřesnosti měření přístroje Isomet 2104 [31] a teplotních čidel Dallas[27] byly provedeny simulace dle jednotlivých variant uvedených v kap. 2.2.2.3

Na následujícím grafu jsou zobrazeny varianty 0 a 2.

Zobrazené varianty simulace modelu s REF betonem v grafu č.

- Varianta 0 – referenční varianta (červená čárkovaná)
- Varianta 2 – varianta se zápornou odchylkou z měření (žlutá plná)
- Varianta 5 – varianta s kladnou odchylkou z měření (fialová plná)
- Reálný průběh měření se zápornou odchylkou z chyby měření čidel (zelená čerchovaná)



Graf. 3.21 Posouzení chyby měření u experimentu č.1

V Tab. 3.9 jsou pro varianty 0 a 2 znázorněny průměrné odchylky mezi teplotou naměřenou a vypočítanou. Pro přehlednost jsou dále tyto odchylky rozděleny na jednotlivé úseky. Lze si povšimnout, že největší nepřesnosti se dosahuje ve 2 úseku (ustálený stav), kde průměrná odchylka referenční varianty nabývá hodnoty 1,11K. Po započítání nejistoty měření teplotních čidel tato odchylka může být od 0,37K do 1,37K.

Tab. 3.9 Průměrné odchylky při měření – exp. č.1

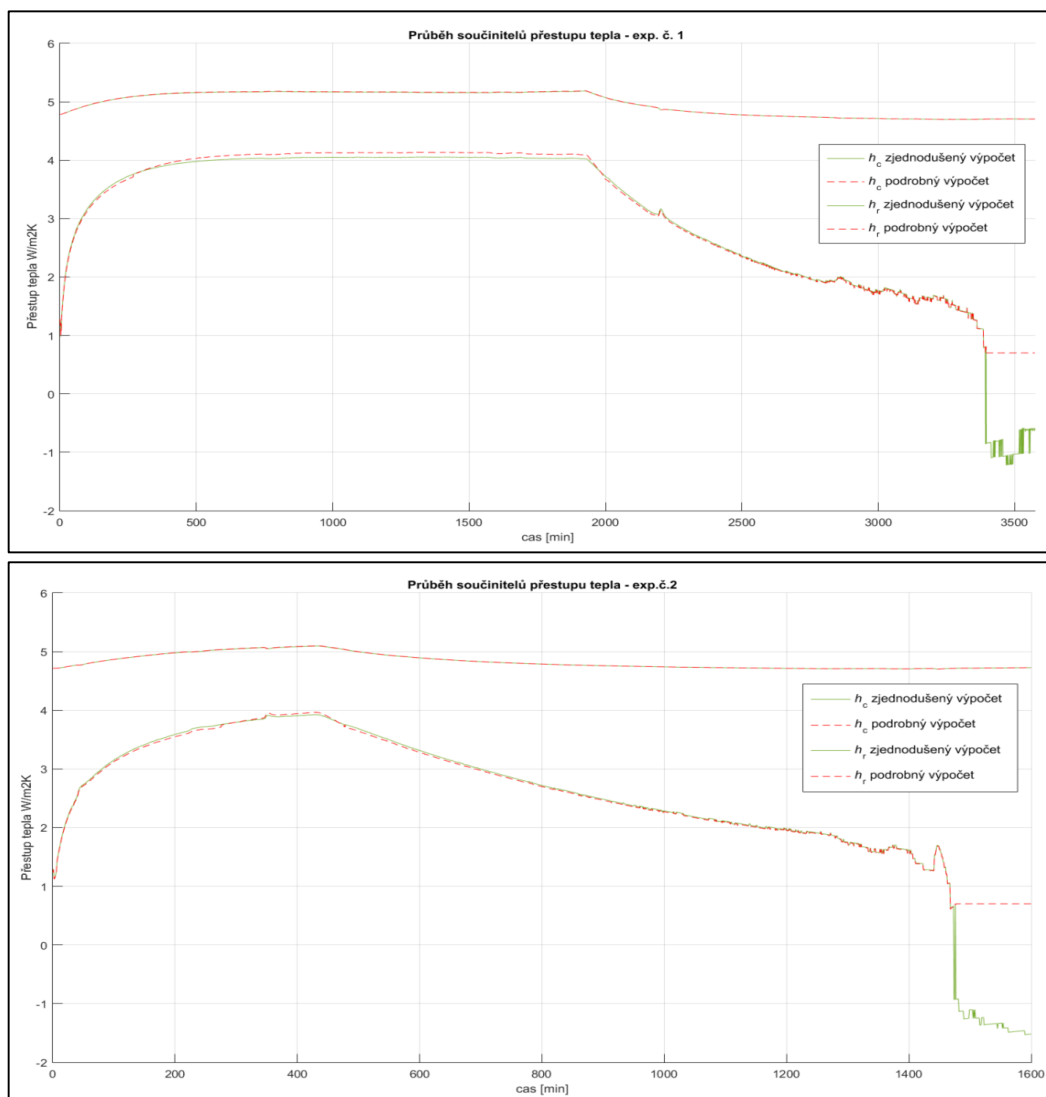
Vrstva B4							
Stav modelu	Úsek číslo	Var. 0	Var.0 (čidlo-0,5K)	Var.0 (čidlo+0,5K)	Var. 2	Var.2 (čidlo-0,5K)	Var.2 (čidlo+0,5K)
Náběh	1	0,83	0,33	1,29	0,25	0,00	0,71
Ustálení	2	1,11	0,37	1,37	0,94	0,20	1,19
Chladnutí	3	0,12	0,00	0,40	0,21	0,00	0,65

3.4 Validace výpočtového modelu objektu

Validace modelu objektu byla zaměřena na zjednodušení principů přenosu tepla podlahy a výběr vhodného výpočtového modelu. Nakonec bylo provedeno porovnání pomocí nezávislého výpočtu potřeby tepla na vytápění mezi měsíční metodou a vlastní simulací s krokem výpočtu 1800s.

3.4.1 Posouzení rozdílů součinitele přestupu tepla

Po provedení simulace modelu podlahy v závislosti na teplotě okolí byli vytvořeny grafy č. a č. , na kterých je zobrazen průběh součinitelů přestupu tepla dle obou způsobů výpočtů zmíněných v kapitole 1.1.2 (podrobné) a dále v kap. 2.2.2 (zjednodušené). Porovnání bylo provedeno na simulaci modelu dle experimentu č.1 (graf č.) a dále na experimentu č.2. (graf č.)

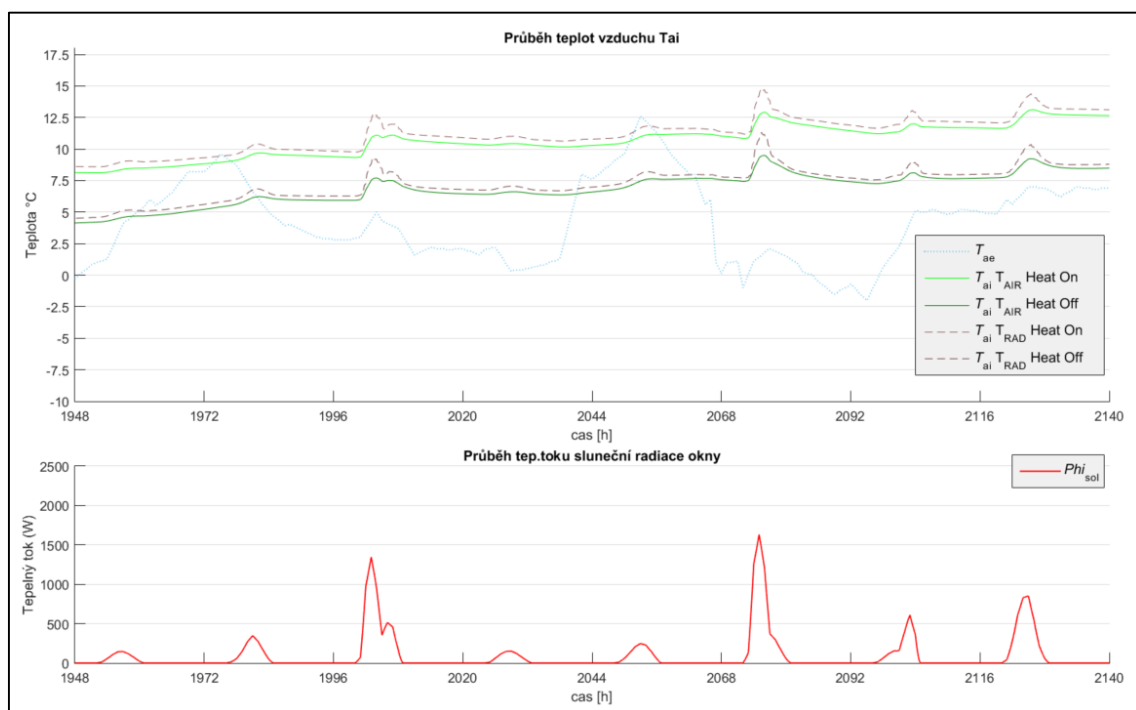


Z proběhlé simulace lze z grafů č. a č. vyčíst, že u součinitele přestupu tepla konvekcí jsou rozdíly mezi použitými rovnicemi zanedbatelné. Ke konci simulace dochází k propadu součinitele do záporných hodnot. Toto je pouze chyba modelu a bude nahrazena hodnotou 0.7W/m2K jako standartní hodnota pro případy obráceného tepelného toku (dolů).

U součinitele přestupu tepla sáláním jsou rozdíly nulové, což je zapříčiněno uvažováním konstant emisivity okolí a směrového úhlu hodnotou 1. Tím se po úpravě rovnice dostaneme k rovnici, která odpovídá rovnici zjednodušené. S tímto zjednodušením ovšem je třeba počítat při vyhodnocení.

3.4.2 Porovnání jedouzlového a dvouzlového modelu budovy

Na grafu č. jsou porovnány výsledné celoroční průběhy teplot u dvou typů modelů – T_{rad} (2.uzly) a T_{air} (1. uzel). Oba typy modelů jsou porovnány při zapnutém (horní křivky) i vypnutém vytápění (spodní křivky).

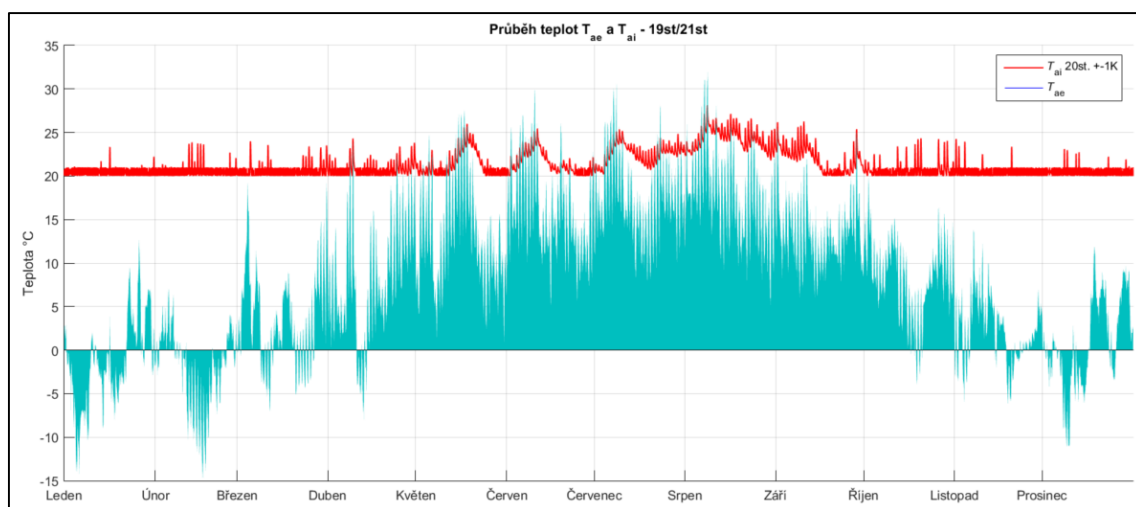


Graf. 3.22 Posouzení modelů

Na základě posouzení rozdílných hodnot teploty v interiéru a dalších kritérií popsaných v kap. 2.3.3.1. byl vybrán model jedouzlový.

3.4.3 Posouzení z hlediska potřeby tepla na vytápění

Pro zjištění celkové potřeby tepla na vytápění pro udržení teploty interiéru v rozmezí 20°C bylo nutné jako zdroj tepla uvažovat externí neomezený zdroj, který funguje jako lokální zdroj tepla se 100% účinností a s nastavenou minimální hysterezí při jeho regulaci. Následně bylo provedeno srovnání s měsíční metodou výpočtu v kap. 2.3.2.2.



Graf. 3.23 Potřeba tepla na vytápění - simulace

Na grafu č. lze vidět celoroční průběh teplot interiéru při nastavené regulaci teploty v interiéru na 20°C +-1K.

Tab. 3.10 Potřeba tepla na vytápění objektu

	Solární zisky	Vnitřní zisky	Ztráta větráním	Ztráta prostupem	Potřeba tepla na vytápění	Potřeba tepla z měsíční metody
Ustálení	9,5	320	-326,0	-1332,2	1328,8	0
Leden	87,4	160	-195,0	-663,8	611,8	690
Únor	179,9	149	-181,7	-621,9	474,4	482
Březen	206,5	160	-149,1	-531,5	314,5	216
Duben	195,4	154	-107,5	-404,8	162,4	40
Květen	139,9	160	-71,7	-271,0	43,2	0
Červen	109,7	154	-48,5	-226,7	11,5	0
Červenec	135,2	160	-46,4	-248,8	0,0	0
Srpen	185,3	160	-61,0	-284,4	0,0	0
Září	182,8	154	-73,7	-273,0	9,4	0
Říjen	183,7	160	-106,0	-379,1	141,8	48
Listopad	102,6	154	-155,4	-537,7	436,0	451
Prosinec	91,6	160	-171,9	-591,9	512,6	689
Suma (kWh)	1800,1	1884,6	1367,7	5034,7	2717,7	2612

V tab. č. jsou shrnuty všechny uvažované energie podílející se v průběhu celého výpočtového roku na výsledné potřebě tepla na vytápění pro referenční budovu. Celková potřeba tepla se pohybuje kolem 2717kWh. Tato hodnota se téměř rovná potřebě tepla vypočítané na základě měsíční metody, kde se vypočtená hodnota rovnala 2612kWh/rok.(Viz. kap. 2.3.2.2)

Měsíční metoda byla založena na výpočtu dle normy ČSN EN ISO 13790 (odkaz), ovšem zjednodušena pro potřeby modelu a jeho následné kontroly.

3.5 Potřeba tepla na vytápění – simulace celoročního provozu

3.5.1 Vliv jednotlivých tepelných toků na celkovou tepelnou bilanci

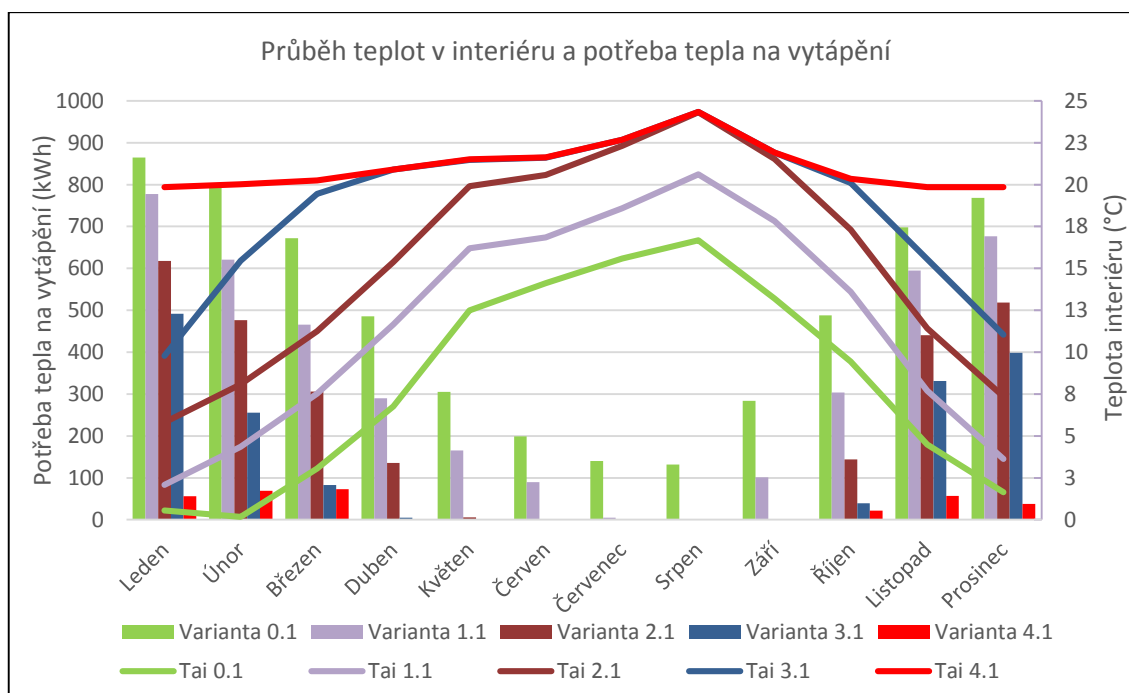
Pro jednotlivé varianty dle kap. 2.3.4. byla provedena celoroční simulace, při kterých byla vyhodnocena potřeba tepla na vytápění (viz graf.č.). Tyto výpočty proběhly vždy s vlivem tepelných ztrát větráním a prostupem konstrukcemi v závislosti na teplotách v exteriéru.

Jednotlivé varianty energetických vstupů pro posouzení vlivu na vnitřní teplotu v Tab. 3.11.

Tab. 3.11 Varianty tepelných toků pro posouzení bilance budovy

REF/PCM	Tepelná ztráta prostupem	Tepelná ztráta větráním	Solární zisky	Vnitřní zisky	Topná rohož Zdroj č.1	Doplňkový zdroj č.2
Varianta 0.1	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)	(-)
Varianta 0.2	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)	ANO
Varianta 1.1	ANO	ANO	ANO	(-)	(-)	(-)
Varianta 2.1	ANO	ANO	ANO	ANO	(-)	(-)
Varianta 3.1	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	(-)
Varianta 4.1	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Na grafu č. jsou graficky zobrazeny celkové potřeby tepelné energie nutné k dosažení návrhové teploty v interiéru. Teploty, které jsou v tomto grafu zobrazeny spojitou křivkou, odpovídají teplotám, kterých je dosaženo při stávajícím množství tepelné energie vycházející z tepelné bilance budovy pro jednotlivé varianty dle tab. č.

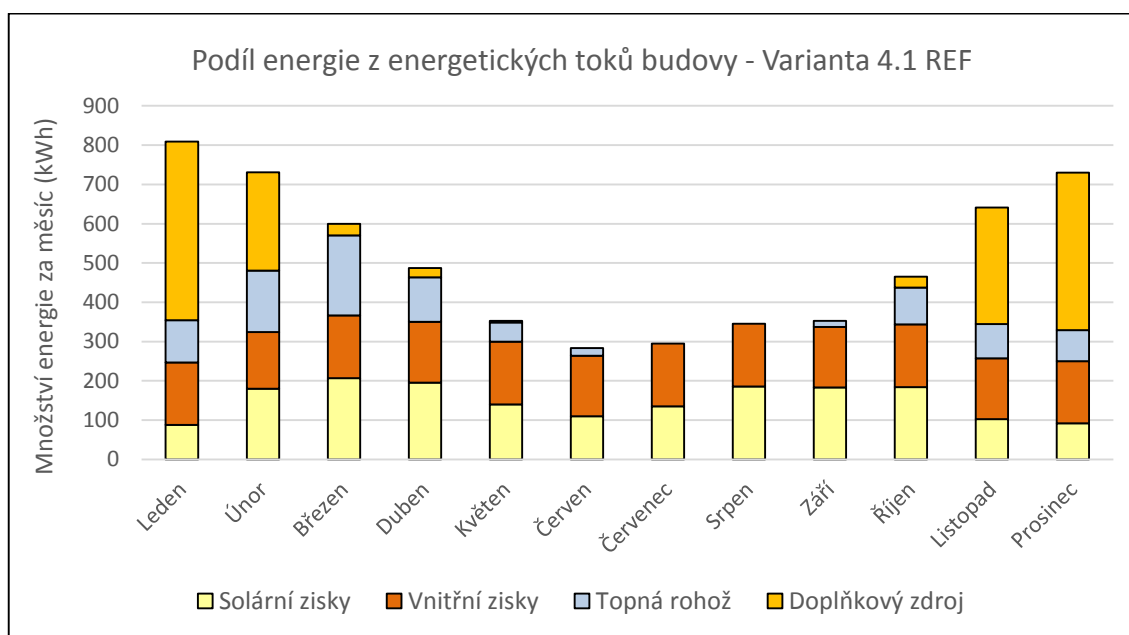


Vzhledem k minimálním rozdílům v celkové potřebě energie mezi modelem s akumulací podlahou s PCM a bez PCM je zobrazen pouze graf pro model s referenčním betonem.

Podrobné výsledky jsou dostupné v příloze č. a v příloze č. pro jednotlivé druhy betonů ve formě tabulek rozdělených po jednotlivých měsících a variantách.

3.5.2 Podíl dílčích tepelných toků na tepelné bilanci modelu budovy

3.5.2.1 Akumulační podlaha s betonem bez PCM



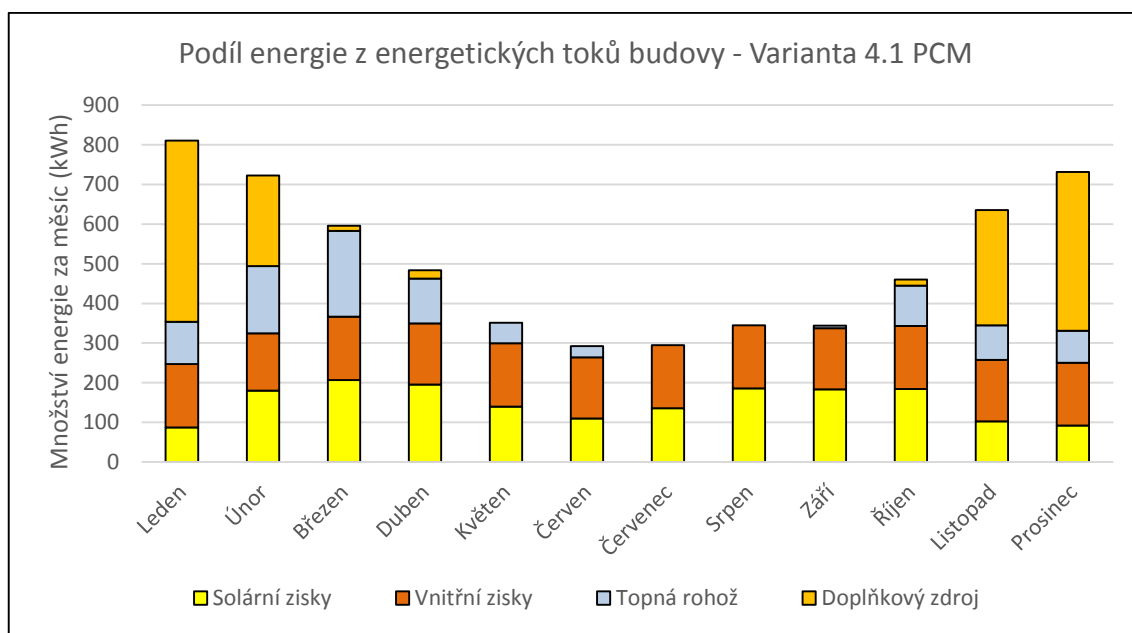
Graf. 3.24 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF

V Tab. 3.12. jsou tyto dílčí energie shrnuty a porovnány s vypočítanou potřebou tepla bez externích zdrojů energie ve variantě 0.2 (Viz. kap. 2.3.4)43

Tab. 3.12 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF

Var 4.1 REF	Solární zisky	Vnitřní zisky	Topná rohož	Doplnkový zdroj	Součet	Teplota T_{ai}	Potřeba tepla Var 0.2	Teplota T_{ai}
Leden	87	160	107	454,7	809	19,85	864,66	20,10
Únor	180	144	157	250,4	731	20,02	800,38	20,12
Březen	207	160	204	29,3	600	20,25	672,16	19,93
Duben	195	155	113	23,5	487	20,90	485,67	19,77
Květen	140	160	49	4,1	353	21,51	305,34	19,59
Červen	110	155	19	0,0	284	21,62	199,25	19,50
Červenec	135	160	0	0,0	295	22,68	140,50	19,46
Srpen	185	160	0	0,0	345	24,34	131,50	19,47
Září	183	155	15	0,0	352	21,91	284,14	19,57
Říjen	184	160	94	27,6	465	20,35	487,52	19,77
Listopad	103	155	87	296,7	641	19,85	697,76	19,98
Prosinec	92	158	79	400,8	730	19,85	768,12	20,02
Suma	1800 kWh	1879 kWh	926kWh	1487,1kWh	6092 kWh	21,1 °C	5837,0kWh	19,8 °C

3.5.2.2 Akumulační podlaha s betonem obsahující PCM



Graf. 3.25 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – PCM

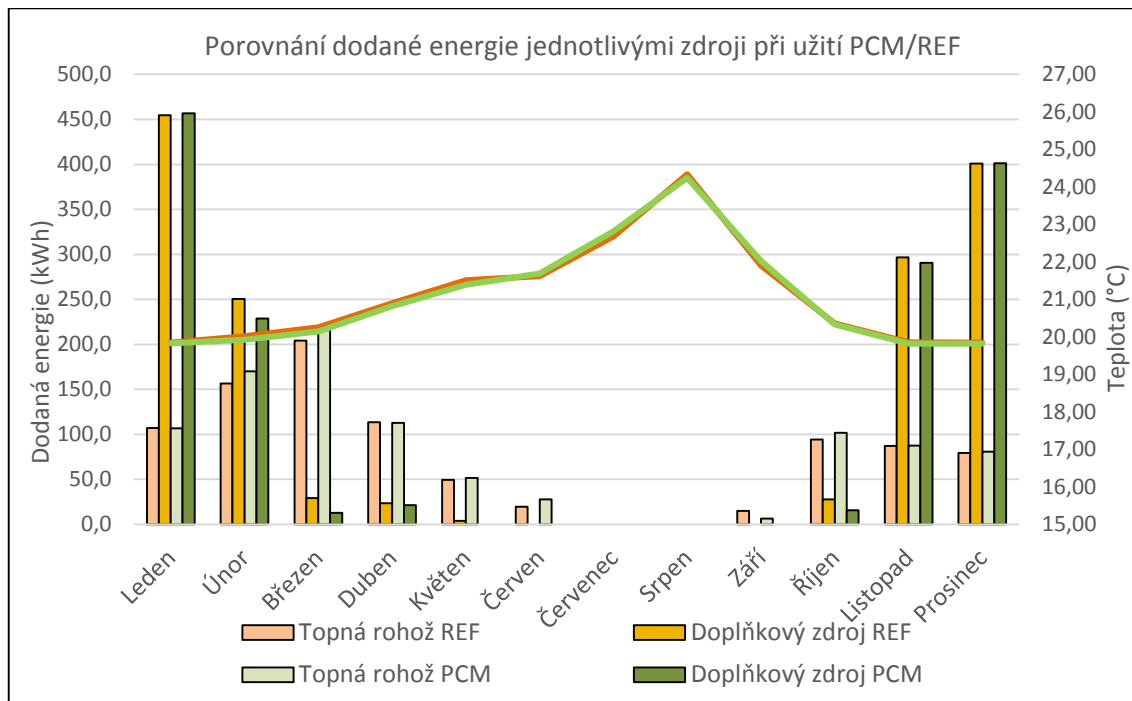
Tab. 3.13. shrnuje vypočítané potřeby tepla a dílčí velikosti předané energie po jednotlivých měsících. Stejně jako v předchozím případě je provedeno porovnání s variantou 0.2 pro PCM, která zohledňuje pouze potřebu tepla z doplňkového zdroje bez vlivu dalších zisků energie (slunce, lidé).

Tab. 3.13 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – PCM

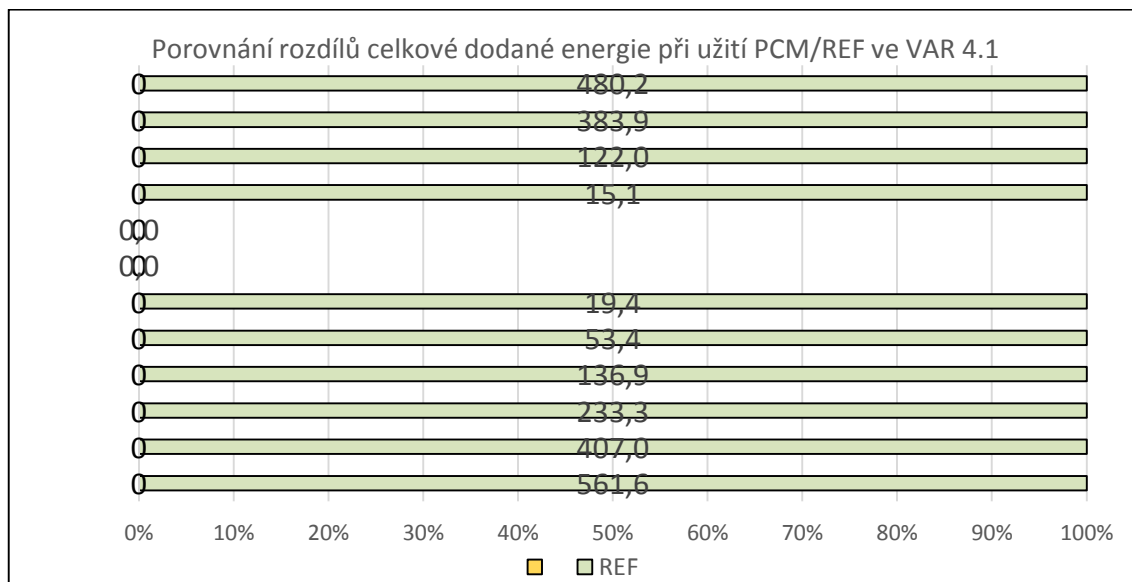
Var 4.1 PCM	Solární zisky	Vnitřní zisky	Topná rohož	Doplnkový zdroj	Součet	Teplota T_{ai}	Potřeba tepla Var 0.2	Teplota
Leden	87	160	107	456,7	810	19,83	864,36	20,11
Únor	180	144	170	228,8	723	19,93	800,89	20,12
Březen	207	160	217	12,8	596	20,15	671,35	19,93
Duben	195	155	113	21,2	484	20,82	483,81	19,77
Květen	140	160	52	0,0	351	21,39	304,37	19,57
Červen	110	155	28	0,0	292	21,69	197,94	19,48
Červenec	135	160	0	0,0	295	22,82	140,17	19,45
Srpen	185	160	0	0,0	345	24,24	129,95	19,44
Září	183	155	6	0,0	344	22,02	284,07	19,57
Říjen	184	160	102	15,6	461	20,33	487,79	19,76
Listopad	103	155	88	290,8	635	19,82	697,42	19,97
Prosinec	92	158	81	401,1	732	19,82	767,77	20,03
Suma	1800 kWh	1879 kWh	962kWh	1427kWh	6068 kWh	21,1°C	5829,9 kWh	19,8°C

3.5.2.3 Porovnání akumulčních podlah z hlediska potřebného výkonu zdroje

Porovnání dat z tabulek č. a č. je pomocí následujícího grafu č. , ve kterém jsou po jednotlivých měsících zobrazeny celkové energie dodané zdroji tepla dle varianty 4.1. V grafu jsou zobrazeny hodnoty pro beton s PCM a referenční beton. Dále je do grafu vložena křivka s průměrnou měsíční teplotou vnitřního vzduchu.



Rozdíly v celkových energiích použitých na vytápění nejsou nijak výrazné. Pouze v přechodných obdobích na jaře a na podzim dochází k určitému výkyvu potřeb energie.



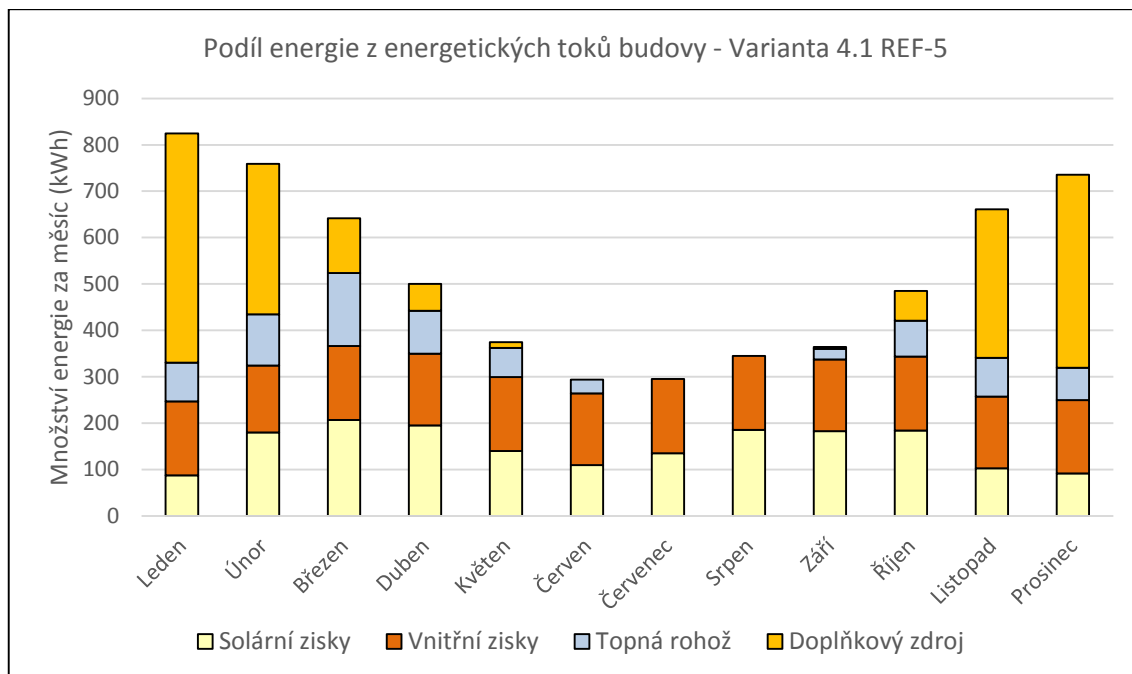
Při procentuálním vyjádření rozdílů celkové dodané energie při užití referenčního betonu a náhrady za beton s PCM je zřetelně vidět, ve kterých měsících dochází k nárůstu spotřeby energie vlivem užití rozdílných materiálů akumulční vrstvy.

Vliv PCM je nejvýraznější v měsíci září, kdy dochází k postupnému uvolňování energie akumulovanému v konstrukci podlahy. Naopak v měsíci Červen dochází k nárůstu celkové dodané energie.

3.5.3 Vliv tloušťky akumulční podlahy

Ve výpočtovém modelu je použita akumulční podlaha s betonem o výšce 200mm. V následující kapitole jsou výsledky vzešlé ze změny této výšky na 50mm, a tedy snížení celkové tepelné kapacity konstrukce. Vyhodnocení je provedeno na betonu bez látek s fázovou přeměnou.

3.5.3.1 Podíl dílčích tepelných toků na tepelné bilanci



Graf. 3.26 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF-5

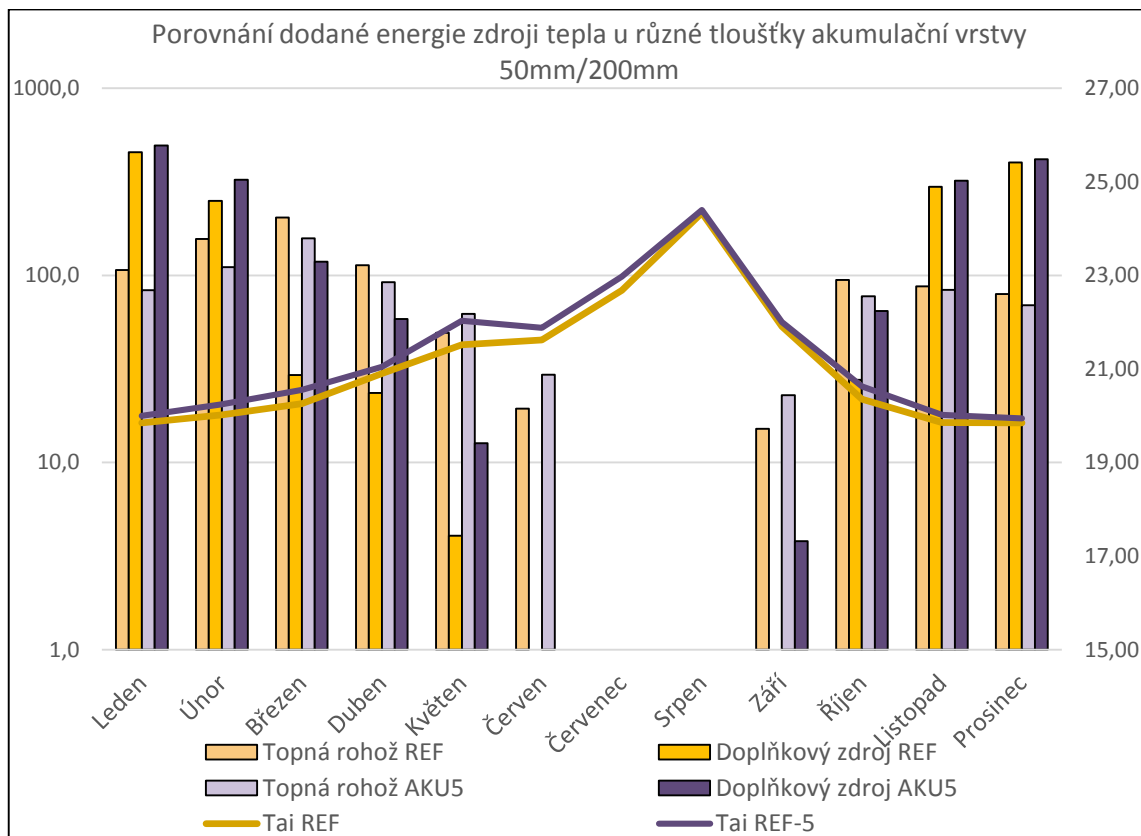
V Graf. 2.1 jsou zobrazeny jednotlivé tepelné toky od vnějších a vnitřních zisků podílející se na celkové tepelné bilanci budovy ve variantě 4.1. Souhrn jednotlivých hodnot je dále v Tab. 3.14, kde je též provedeno porovnání s Var 0.2.

Tab. 3.14 Podíl tepelných toků v budově – Var 4.1 – REF-5

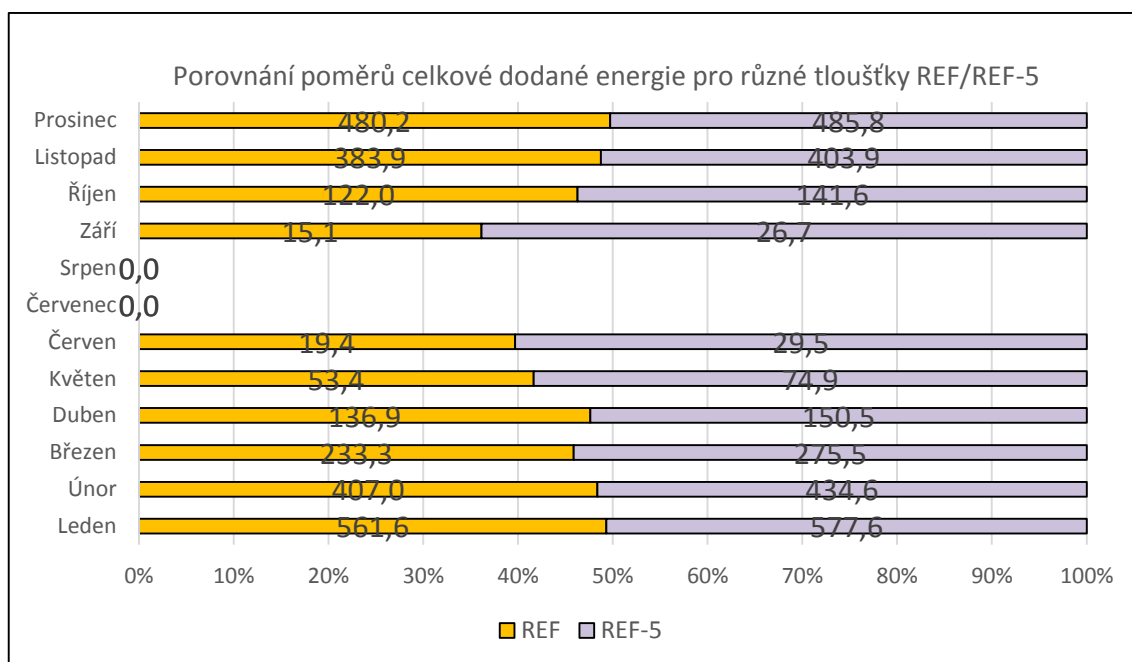
Var 4.1 REF-5	Solární zisky	Vnitřní zisky	Topná rohož	Doplňkový zdroj	Součet	Teplota Tai	Potřeba tepla Var 0.2	Teplota Tai
Leden	87	160	83	494,3	825	20,00	863,88	20,10
Únor	180	144	111	323,8	759	20,24	801,08	20,12
Březen	207	160	157	118,1	642	20,55	674,52	19,94
Duben	195	155	92	58,4	500	21,05	486,00	19,78
Květen	140	160	62	12,7	374	22,03	304,84	19,59
Červen	110	155	29	0,0	294	21,88	202,38	19,51
Červenec	135	160	0	0,0	295	22,97	141,01	19,48
Srpen	185	160	0	0,0	345	24,39	133,93	19,51
Září	183	155	23	3,8	364	22,00	284,78	19,59
Říjen	184	160	77	64,4	485	20,63	485,56	19,77
Listopad	103	155	84	320,3	661	20,01	698,40	19,97
Prosinec	92	158	69	416,6	736	19,94	769,38	20,03
Suma	1800 kWh	1879 kWh	788kWh	1812,4 kWh	6280 kWh	21,31 °C	5845,8 kWh	19,78 °C

3.5.3.2 Porovnání potřeby tepla na vytápění

Na grafu č. je zobrazena celková dodaná energie jednotlivými zdroji tepla pro jednotlivé měsíce v roce. Dále je zobrazena průměrná měsíční teplota. Vlivem menší akumulční schopnosti se viditelně zvedla teplota interiéru u varianty s 50mm tloušťkou vrstvy,



Porovnání celkové potřeby dodané energie na grafu č.. **Vidět je jistý nepoměr.**



3.6 Tepelná stabilita – simulace celoročního provozu

Z provedených simulací dle variant v kap.2.3.4. byli spolu s potřebou tepla na vytápění vypočítány také průběhy teplot vnitřního prostředí během celého roku. Vzhledem k tomu, že celkové energetické bilance nejsou dostatečně čitelné pro posouzení tepelného komfortu, je tato kapitola věnována právě tomu.

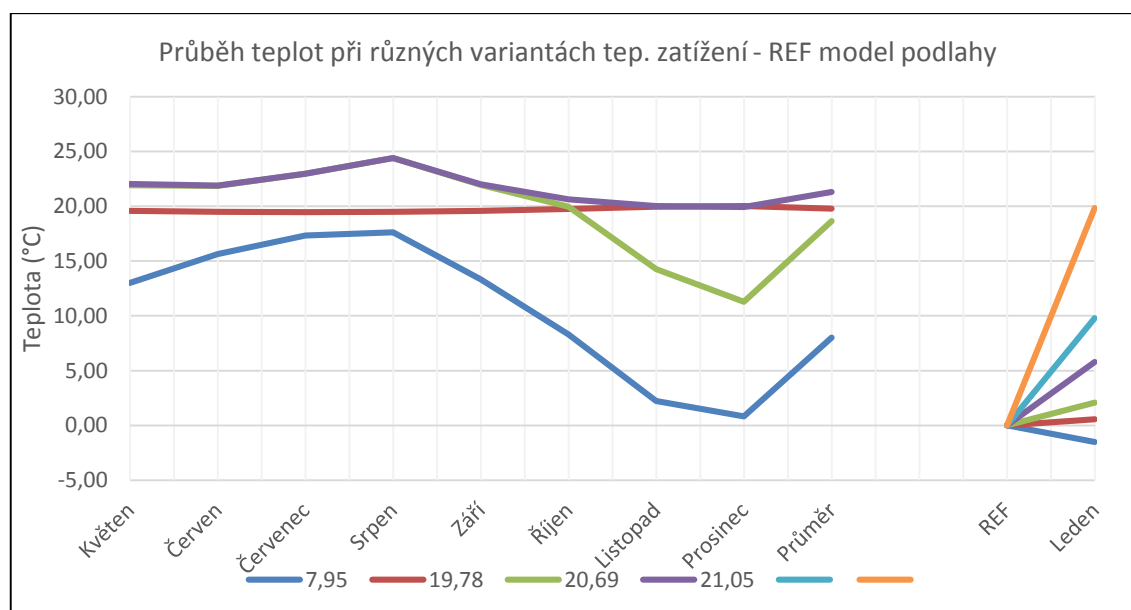
3.6.1 Vliv jednotlivých tepelných toků na vnitřní teplotu

3.6.1.1 Průměrné měsíční teploty vnitřního prostředí

Postupnou aktivací jednotlivých tepelných toků v rámci modelu budovy dochází k postupnému zvyšování teploty vnitřního uzlu T_{ai} . V tab. č. a č. jsou pro přehlednost tyto hodnoty zprůměrovány vždy pro každý měsíc zvlášť.

Hodnoty teplot platné pro výpočet s referenčním betonem akumulací podlahy v tab. č. a následně v grafu č. (s drobnými odchylkami platný i pro variantu betonu s PCM).

REF	T_{ext}	Var 0.1 REF	Var 1.1 REF	Var 2.1 REF	Var 3.1 REF	Var 4.1 REF	Var 0.2 REF
Leden	-1,50	0,56	2,09	5,81	9,79	19,85	20,10
Únor	-2,06	0,16	4,36	8,08	15,46	20,02	20,12
Březen	3,56	3,06	7,53	11,24	19,45	20,25	19,93
Duben	7,95	6,77	11,66	15,37	20,91	20,90	19,77
Květen	13,02	12,49	16,19	19,91	21,47	21,51	19,59
Červen	15,64	14,11	16,85	20,57	21,61	21,62	19,50
Červenec	17,34	15,59	18,59	22,31	22,68	22,68	19,46
Srpen	17,62	16,67	20,61	24,33	24,34	24,34	19,47
Září	13,33	13,20	17,82	21,54	21,91	21,91	19,57
Říjen	8,31	9,43	13,59	17,31	20,09	20,35	19,77
Listopad	2,24	4,49	7,70	11,42	15,55	19,85	19,98
Prosinec	0,83	1,65	3,63	7,35	11,05	19,85	20,02
Průměr (°C)	8,02	8,18	11,72	15,44	18,69	21,09	19,77



Hodnoty teplot platné pro výpočet s betonem akumulární podlahy obsahující PCM v tab. č.

PCM	T _{ext}	Var 0.1 PCM	Var 1.1 PCM	Var 2.1 PCM	Var 3.1 PCM	Var 4.1 PCM	Var 0.2 PCM
Leden	-1,50	0,53	2,07	5,79	9,76	19,83	20,11
Únor	-2,06	0,14	4,36	8,08	15,60	19,93	20,12
Březen	3,56	3,09	7,57	11,28	19,59	20,15	19,93
Duben	7,95	6,81	11,70	15,41	20,74	20,82	19,77
Květen	13,02	12,53	16,21	19,79	21,38	21,39	19,57
Červen	15,64	14,13	16,87	20,55	21,69	21,69	19,48
Červenec	17,34	15,61	18,56	22,01	22,82	22,82	19,45
Srpen	17,62	16,67	20,49	24,14	24,24	24,24	19,44
Září	13,33	13,18	17,99	21,93	22,02	22,02	19,57
Říjen	8,31	9,40	13,58	17,61	20,18	20,33	19,76
Listopad	2,24	4,44	7,63	11,37	15,72	19,82	19,97
Prosinec	0,83	1,64	3,62	7,34	11,05	19,82	20,03
Průměr (°C)	8,02	8,18	11,72	15,44	18,73	21,07	19,77

3.6.1.2 Porovnání vlivu PCM a referenčního betonu na měsíční průměry teplot

Pro porovnání a následné vyhodnocení vlivu rozdílných variant a materiálů jsou v tab. č. vypočteny odchylky průměrných teplot. Vzhledem k předpokladu, že látky s fázovou přeměnou obsažené v podlaze napomáhají zlepšit stabilitu vnitřního prostředí vytápěné budovy, je žádané, aby průměrná odchylka teplot v zimních měsících byla kladná (vyšší teplota), a v letních měsících naopak (nižší teplota).

Měsíc	Var 0.1 PCM	Var 1.1 PCM	Var 2.1 PCM	Var 3.1 PCM	Var 4.1 PCM
Leden	-0,03	-0,02	-0,01	-0,03	-0,02
Únor	-0,03	0,00	0,00	0,14	-0,09
Březen	0,03	0,04	0,04	0,14	-0,11
Duben	0,04	0,04	0,03	-0,17	-0,08
Květen	0,04	0,02	-0,13	-0,09	-0,12
Červen	0,02	0,02	-0,02	0,08	0,07
Červenec	0,02	-0,03	-0,30	0,14	0,14
Srpen	0,01	-0,12	-0,19	-0,10	-0,10
Září	-0,02	0,17	0,40	0,11	0,11
Říjen	-0,04	-0,01	0,29	0,09	-0,02
Listopad	-0,05	-0,06	-0,05	0,17	-0,04
Prosinec	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,03

Z jednotlivých odchylek je patrné, že vyšších teplot v otopném období dosahuje model s PCM u varianty 3.1. vyjma ledna a prosince, kdy je rozdíl zanedbatelný. V případě varianty 4.1. je model s PCM v případě teplot lehce pod teplotou modelu referenčního.

3.6.1.3 Četnost výskytu teplot interiéru v zóně tepelné pohody

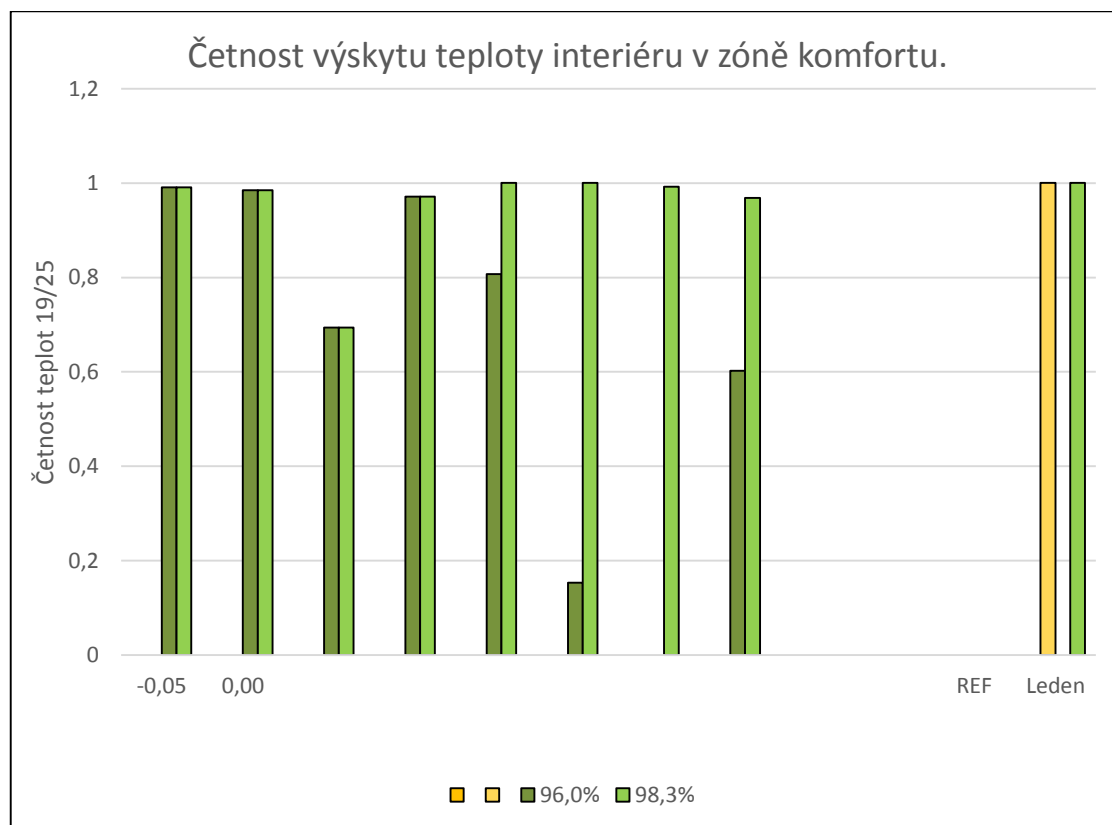
Pro účely posouzení vlivu rozdílných akumulčních podlah a typu vytápění byla vyhodnocena četnost teplot v daném intervalu. Pro posouzení byl uvažován interval 19°C až 25°C.

REF	Var 0.1 REF	Var 1.1 REF	Var 2.1 REF	Var 3.1 REF	Var 4.1 REF
Leden	0%	0%	0%	0%	100%
Únor	0%	0%	0%	7%	100%
Březen	0%	0%	0%	64%	100%
Duben	0%	0%	6%	95%	100%
Květen	0%	12%	62%	96%	98%
Červen	0%	9%	83%	99%	99%
Červenec	0%	44%	100%	99%	99%
Srpen	0%	93%	70%	69%	69%
Září	0%	29%	91%	97%	97%
Říjen	0%	0%	21%	81%	100%
Listopad	0%	0%	1%	15%	100%
Prosinec	0%	0%	0%	0%	99%
Průměr	0%	16%	36%	60%	97%

PCM	Var 0.1 PCM	Var 1.1 PCM	Var 2.1 PCM	Var 3.1 PCM	Var 4.1 PCM
Leden	0%	0%	0%	0%	100%
Únor	0%	0%	0%	6%	100%
Březen	0%	0%	0%	75%	100%
Duben	0%	0%	6%	92%	100%
Květen	0%	11%	65%	99%	99%
Červen	0%	9%	92%	100%	100%
Červenec	0%	41%	100%	99%	99%
Srpen	0%	94%	77%	74%	74%
Září	0%	32%	97%	97%	97%
Říjen	0%	0%	25%	88%	100%
Listopad	0%	0%	1%	15%	100%
Prosinec	0%	0%	0%	0%	99%
Průměr	0%	16%	39%	62%	97%

Při porovnání obou typů konstrukcí lze vidět, že ačkoliv průměrné teploty se výrazněji neliší, jsou zde patrné rozdíly v četnosti jednotlivých teplot. Z hlediska letní stability došlo k mírnému poklesu teplot převyšující 25°C, a při variantě č.3.1. je vidět mírné zlepšení během několik měsíců v zimním období.

Ve sloupcovém grafu č. jsou zobrazeny takto vypočtené četnosti teplot pro variantu 3.1. a 4.1.

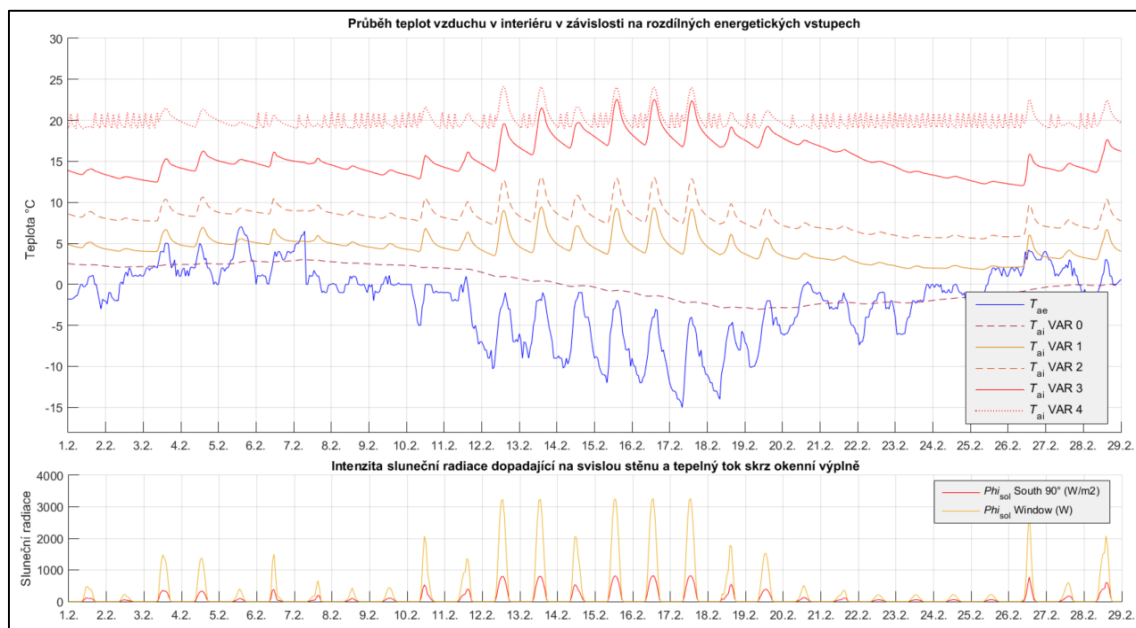


V Tab. 3.15 jsou dále uvedeny nejvyšší hodnoty teplot, kterých je dosaženo při výpočtu dle varianty č.4.1, v druhé části tabulky jsou dále uvedeny nejnižší dosažené teploty při variantě č.3.1., kdy není k dispozici dodatečný zdroj energie. Díky tomu lze pozorovat vliv jednotlivých typů konstrukce na pokles vnitřní teploty.

Tab. 3.15 Nejnižší a nejvyšší měsíční teploty pro var 3.1 a 4.1

Měsíc	Nejvyšší teplota - Varianta 4.1.				Nejnižší teplota - Varianta 3.1.		
	REF VAR 4.1.	PCM VAR 4.1.	REF-5 VAR 4.1.		REF VAR 3.1.	PCM VAR 3.1.	REF-5 VAR 3.1.
Leden	23,3	23,2	23,9		6,5	6,4	3,2
Únor	24,1	24,0	24,7		12,0	12,5	8,7
Březen	24,3	24,3	25,0		15,7	16,0	15,7
Duben	25,0	24,9	25,0		18,6	18,6	16,6
Květen	26,2	25,4	27,8		18,8	19,1	18,3
Červen	25,5	25,0	26,7		19,0	19,3	19,2
Červenec	25,5	25,2	27,0		20,4	21,2	19,9
Srpen	28,1	27,8	29,7		21,8	22,0	20,8
Září	26,3	26,3	26,5		19,5	19,4	18,7
Říjen	24,7	24,4	25,2		17,6	18,3	15,9
Listopad	24,6	24,3	25,0		9,9	9,9	7,9
Prosinec	23,1	22,8	23,7		7,5	7,4	6,2

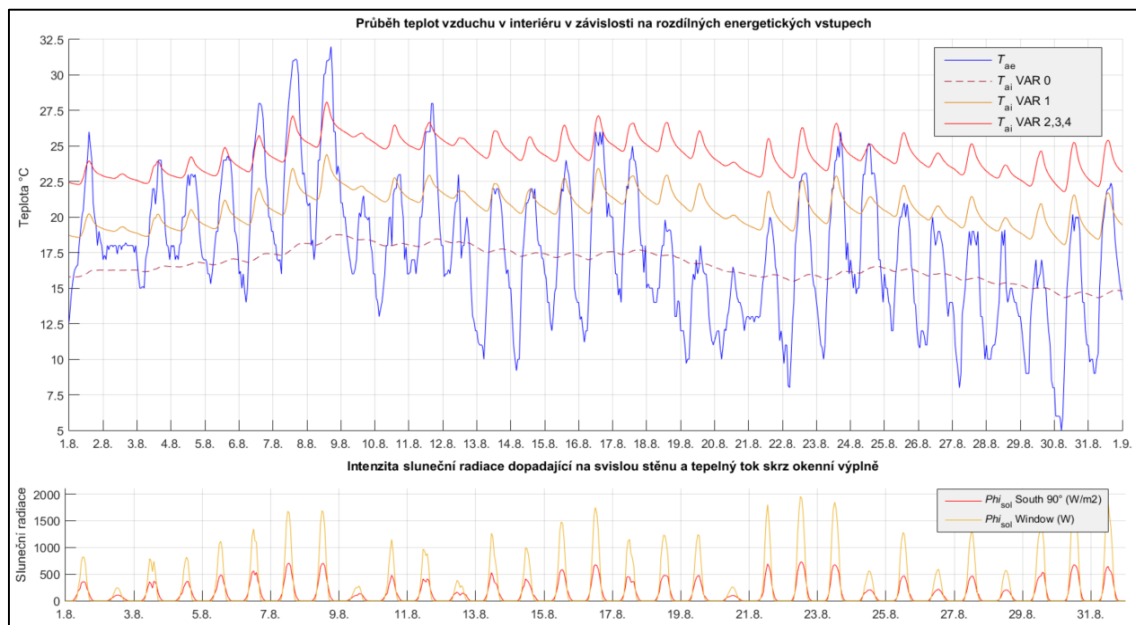
3.6.1.4 Zimní období – typický měsíc Únor



Graf. 3.27 Průběh teplot v závislosti na různých variantách tepelných zisků – Zimní období (Leden)

Na Graf. 3.27. jsou vykresleny průběhy teplot jednotlivých variant během typického zimního měsíce (1.2 do 29.2), kde se střídá relativně teplé počasí s venkovními teplotami mírně nad nulou, a s teplotami v druhé půlce měsíce, které jsou již výrazně chladnější, ovšem také slunečnější. Ke konci měsíce se dále teploty drží pod bodem mrazu, ovšem již bez výrazných slunečních zisků.

3.6.1.5 Letní období – typický měsíc Srpen



Graf. 3.28 Průběh teplot v závislosti na různých variantách tepelných zisků – Letní období (Srpen)

Na Graf. 3.28. jsou vykresleny průběhy teplot v letním období. Zobrazena je pouze varianta 0 až 2, jelikož varianty 3 a 4 jsou totožné s variantou číslo 2. Zdroje tepla jsou v této době zcela mimo provoz.

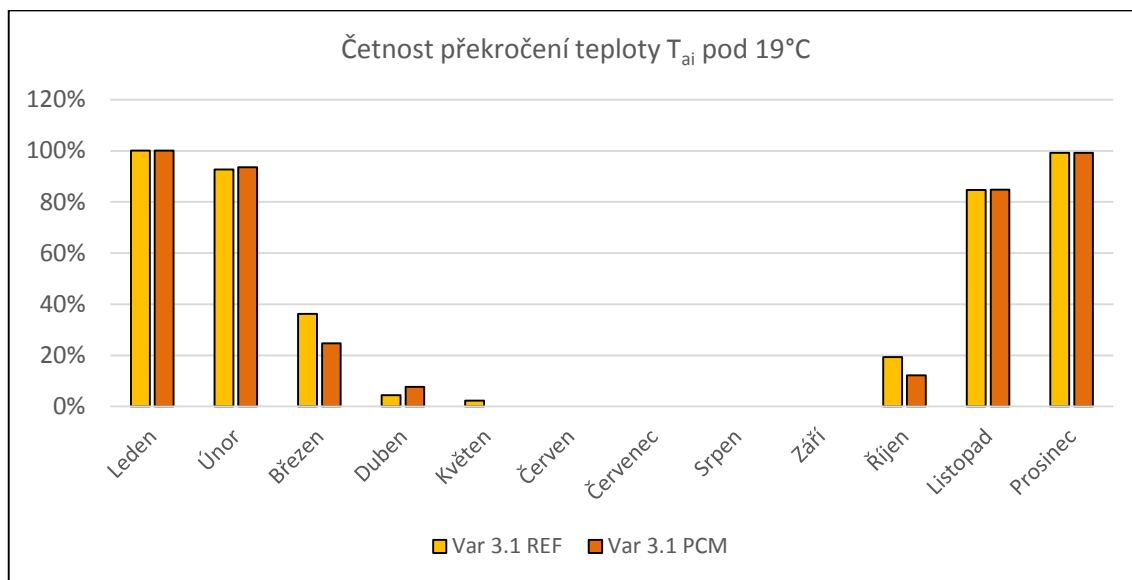
Zobrazen je měsíc Srpen (od 1.8 do 31.8), přičemž v první třetině měsíce panují tropické teploty nad 30°C. Ve zbývajících dvou třetinách měsíce se již teplota venkovního vzduchu pohybuje běžně kolem 20°C. Většina měsíce je bez oblačnosti, pouze 7 dní je zamračených.

3.6.2 Vliv použití látek s fázovou přeměnou na teplotu interiéru

Pro posouzení vlivu použití PCM látek v akumulační vrstvě betonu bylo provedeno srovnání průběhů teplot vnitřního uzlu T_{ai} u varianty číslo 3.1., u které vlivem většího kolísání teplot jsou výsledné rozdíly nejpatrnější.

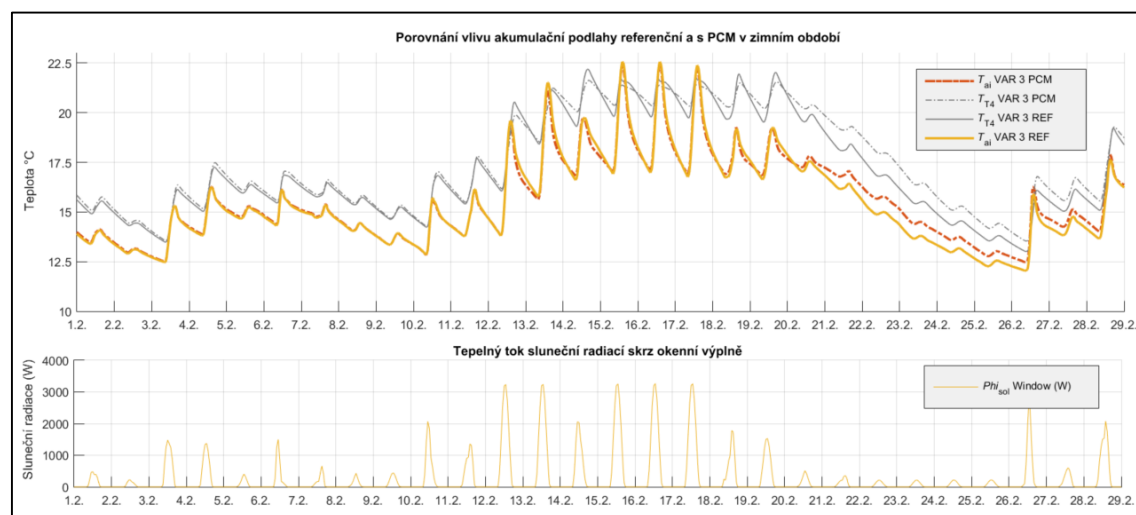
3.6.2.1 Četnost překročení teplotního maxima v zimním období

Pro porovnání jsou vypočítány četnosti teplot, které se během jednotlivých měsíců pohybují pod kritickou hodnotou tepelného komfortu. (varianta 3.1.)



3.6.2.2 Průběh teplot v zimním období

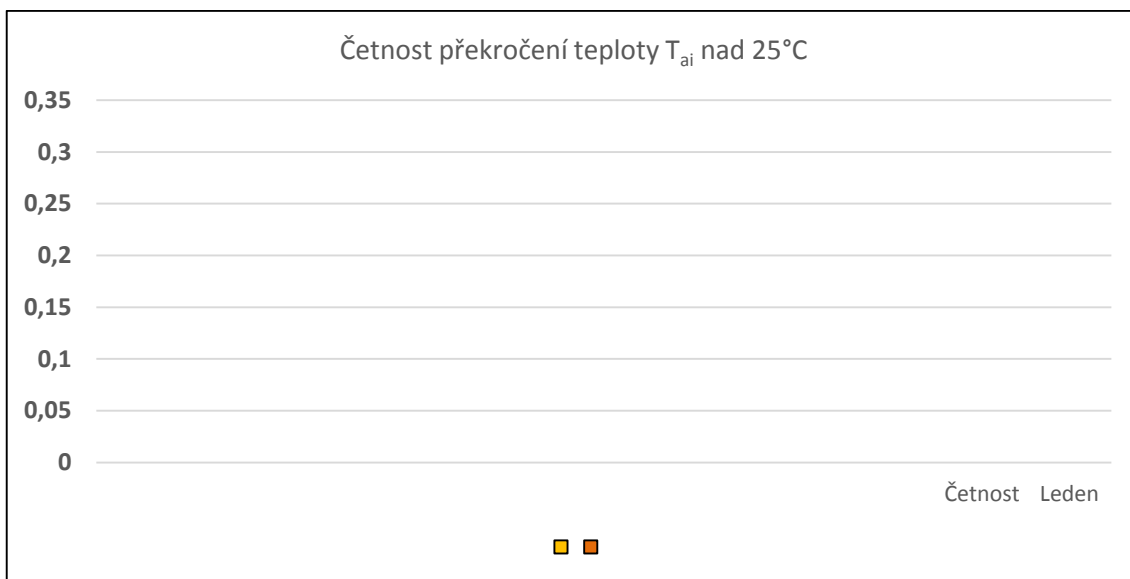
V grafu č. je provedeno srovnání teploty vnitřního uzlu a dále je porovnána teplota ve vrstvě betonu T_4 , která leží 40mm nad topnou rohoží. Výška akumulační vrstvy je 200mm.



Graf. 3.29 Porovnání průběhů teplot T_{ai} v zimním období - PCM/REF

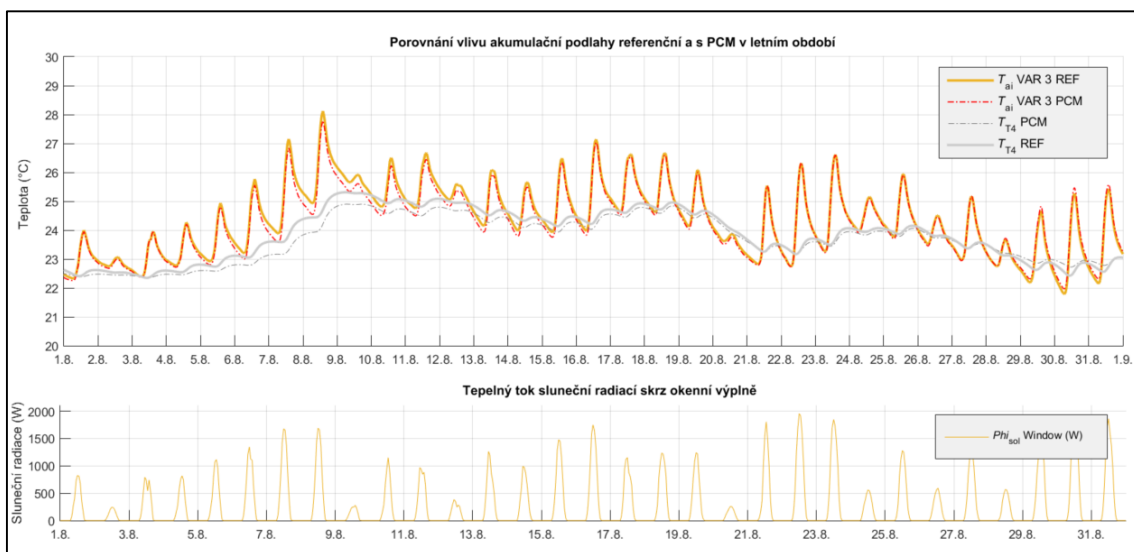
Na průběhu teplot interiéru je patrný vliv betonu s PCM při vyšších tepelných ziscích, kde dochází k nárůstu vnitřní teploty akumulační vrstvy a následnému tavení obsažených parafínů, což má za následek, že teplota akumulační vrstvy stoupá pomaleji oproti vrstvě bez PCM. Při následném několikadenním ochlazení bez dostatku sluneční energie lze pozorovat viditelně pomalejší pokles vnitřní teploty interiéru v důsledku rozložení tepelného toku v čase.

3.6.2.3 Četnost překročení teplotního minima v letním období



Z grafu č. je zřejmé, že po většinu roku je vliv akumulční podlahy dostatečný ke stabilizaci vnitřního prostředí budovy z hlediska překročení hranice 25°C, která se již dá považovat za hraniční z hlediska tepelného komfortu. Pouze v měsíci Srpen, který je též nejteplejším měsícem v roce dochází k překročení této hodnoty ve třetině případů.

3.6.2.4 Průběh teplot v letním období



Graf. 3.30 Porovnání průběhů teplot T_{ai} v letním období - PCM/REF

Dle průběhu teplot vnitřního uzlu T_{ai} dochází během první půlky měsíce k rychlejšímu poklesu teploty během nočních hodin. Také vrcholy jednotlivých tepelných maxim se pohybují při nejvyšších tepelných zátěžích zhruba o 0,3K níž. V druhé půlce měsíce je již akumulční vrstva podlahy plně nabitá a průběh teplot je téměř totožný u obou konstrukcí.

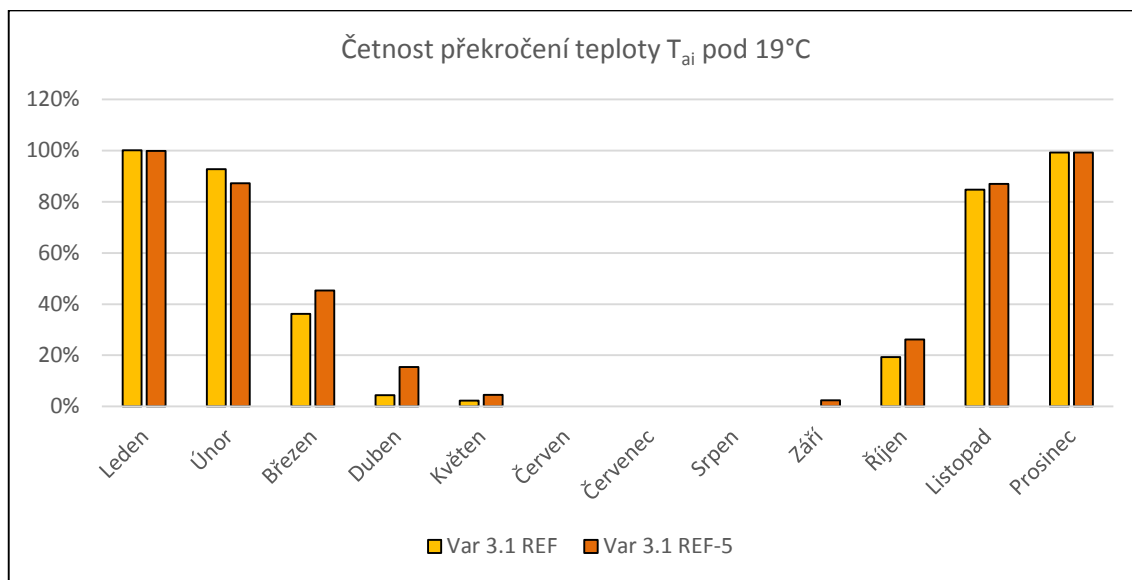
Tento proces nabití a vybití akumulční podlahy dobře ilustruje též křivka teploty v akumulční podlaze, kde při navýšování tepelné energie vlivem přehřívání vnitřního prostředí dochází k rychlejšímu ohřevu referenčního betonu bez látek s fázovou přeměnou.

3.6.3 Vliv tloušťky akumulční vrstvy podlahy na teplotu interiéru

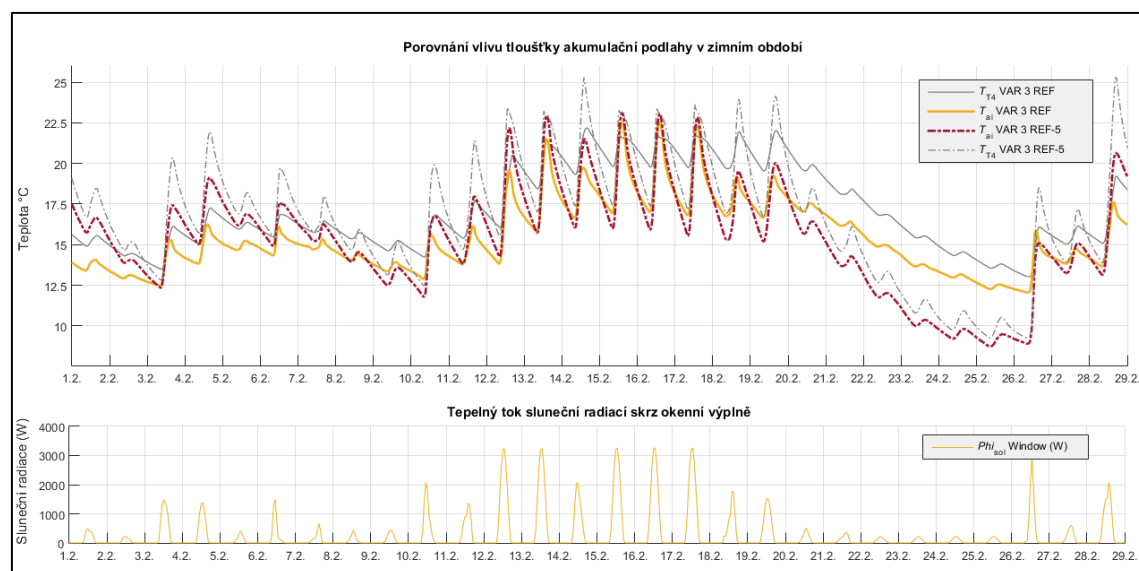
Porovnání změny celkové tepelné kapacity konstrukce podlahy z hlediska teploty v interiéru během celoročního provozu je provedeno na případu akumulční podlahy bez látek s fázovou přeměnou o dvou rozdílných tloušťkách 50mm a 200mm.

3.6.3.1 Četnost překročení teplotního minima v zimním období

Na grafu č. jsou zobrazeny četnosti překročení teplot pod 19°C při porovnání akumulční vrstvy výšky 50mm a 200mm.



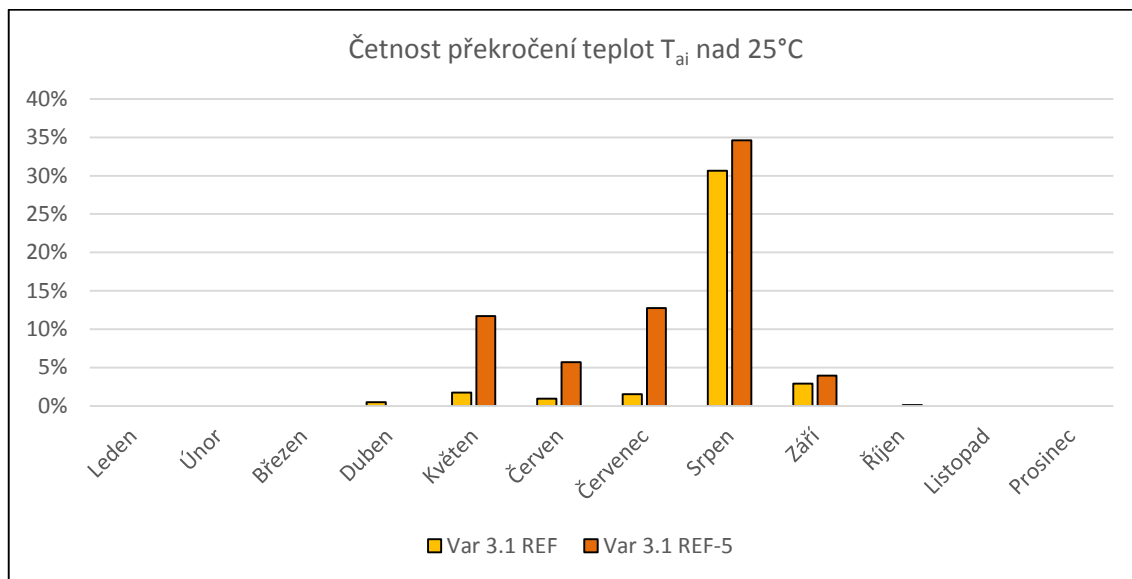
Jsou vidět rozdíly zejména v přechodném období jaro-léto, kdy konstrukce s nižší výškou akumulční vrstvy vykazuje menší tepelnou stabilitu. Během dne dochází k dosažení vyšších teplot interiéru, ovšem po přerušení tepelných zisků od slunečního záření dojde k rychlé ztrátě vnitřní naakumulované energie, a k poklesu teploty. Viz graf č. ,kde je zobrazen průběh teplot pro měsíc Únor.



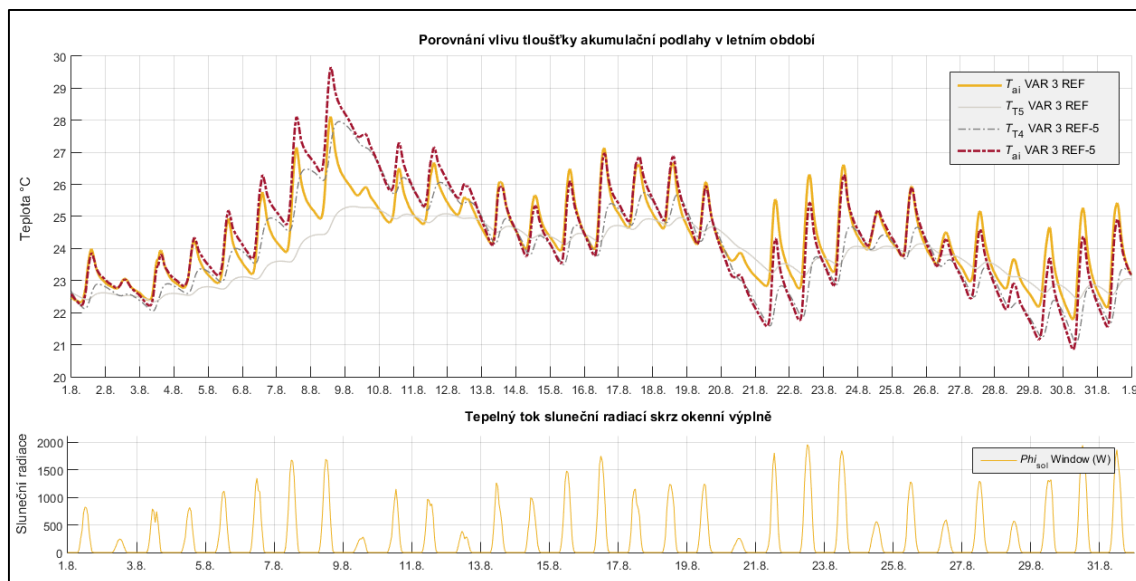
Graf. 3.31 Vliv tloušťky akumulční vrstvy na teplotu T_{ai} v zimním období

3.6.3.2 Četnost překročení teplotního maxima v letním období

Na grafu č. jsou zobrazeny četnosti překročení teplot nad 25°C při porovnání akumulční vrstvy výšky 50mm a 200mm.



Na Graf. 3.32. jsou dále zobrazeny průběhy teplot v rámci měsíce Srpen, kdy dochází k největší tepelné zátěži budovy vlivem vysokých teplot a slunečních zisků.



Graf. 3.32 Vliv tloušťky akumulční vrstvy na teplotu T_{ai} v letním období

Významně lze pozorovat vliv tloušťky akumulční vrstvy na stabilizaci maximálních teplot v interiéru, kdy rozdíl mezi teplotami v budově činí až 1,5K při dosažení maximální teploty.

4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

4.1 Výpočtový a experimentální model podlahy

Vzhledem k zadání této diplomové práce – ověřit vliv akumulární podlahy na tepelnou stabilitu vnitřního prostředí, bylo nutné si vytvořit ucelenou představu o tom, jak tento typ konstrukce ve spojení s elektrickou topnou rohoží funguje. Byla provedena podrobnější analýza vlastností samotné akumulární vrstvy a následně provedeno experimentální měření modelu podlahy.

4.1.1 Vlastnosti betonové směsi

4.1.1.1 Pevnost v tlaku a tahu

Provedením měření mechanických vlastností betonové směsi pomocí zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu dle kapitoly 2.1.1.4 lze učinit několik závěrů:

- Z grafu č. 1 lze vyvodit, že pevnosti v tlaku a tahu s přibývajícím množstvím látek s fázovou přeměnou, které jsou obsaženy ve formě mikrokapslí, výrazně klesají
- Dle normy ČSN 744505 [8] je doporučená pevnost v tahu za ohybu pro použití betonů jako podlahových potěrů (třída F4) hodnota 2,5Mpa. Z toho vyplývá, že použití již 4% PCM dochází k podkročení této hranice, a je tedy nutno uvážit použití této směsi při použití jako roznášecí vrstva podlahových konstrukcí.
- Při porovnání naměřených výsledků ze vzorků č. 1 (graf č. 1) a vzorku č. 2 (graf č. 2) je výrazný rozdíl zejména v pevnosti v tahu za ohybu. Obě směsi byli míchány ve stejných poměrech jednotlivých složek, za použití jiných pomůcek a jiných dodavatelů materiálů. Nutno podotknout, že příprava druhého vzorku byla provedena s větší přesností a za použití kvalitnějších pracovních pomůcek.
- Pevnost referenčního betonu u vzorku č.2 odpovídá cca třídě betonu C20/25, zatímco beton s PCM 4% již nesplňuje ani hodnoty pro třídu betonu C12/15.

4.1.1.2 Tepelně-technické vlastnosti

Během měření tepelně technických vlastností vyvstal několik skutečností, které je nutno uvést:

- Změřená tepelná vodivost ve směsi s PCM měla být ověřena pomocí přístroje Heat flow meter [32] primárně určený na testování tepelných izolací. Zřejmě vlivem velké tepelné kapacity vzorků vlastní měření vykazovalo nelogické hodnoty, které nebylo možné považovat za dostatečně věrohodné a měření nebylo nakonec provedeno.
- Při testování měřícím přístrojem Isomet [31] je pravděpodobné, že změřená tepelná vodivost je ovlivněna nevhodně nastavenou teplotou při měření. Teplota tání parafínů je poblíž hodnoty, kterou měřící přístroj používá pro vlastní měření příložnou sondou.
- Měření u prvního vzorku probíhalo na obou stranách testovací dlaždice. Ovšem horní povrch byl z technologického hlediska nevhodný pro měření. Jeho povrch byl zvrásněný a tudíž nebyl zajištěn vhodný kontakt s měřící sondou měřícího přístroje.
- Pro validaci experimentálního modelu jsou zohledněny pouze hodnoty vzešlé z měření u vzorků č. 2. Vzorky č.1 byli míchány za odlišných podmínek, zejména na jiném druhu míchacího zařízení, a po delší dobu.

Po provedení série měření přenosným přístrojem Isomet 2104 [31] na vzorcích č.2 lze prohlásit, že:

- Rozdíl mezi tepelnou vodivostí betonu bez PCM a betonu PCM obsahující je 25%. Z původní hodnoty $2,2\text{W/m}^2\text{K}$ klesla výsledná vodivost na hodnotu $1,65\text{W/m}^2\text{K}$.
- Bez povšimnutí nelze nechat, že původní měření na vzorcích č.1 vycházelo z pohledu tepelné vodivosti o cca 20% hůře (např. referenční vzorek č.1 $1,75\text{W/m}^2\text{K}$ oproti ref. Vzorku č.2 $2,2\text{W/m}^2\text{K}$).
- Dalším zajímavým faktem je, že normové hodnoty tepelné vodivosti udávané pro beton hutný o objemové hmotnosti 2100kg/m^3 je $1,23\text{W/mK}$. Zde se nabízí otázka, na kolik taková odchylka může způsobit nepřesnost ve výpočtech, které jsou založené primárně na vedení tepla v betonové vrstvě.
- Tepelná kapacita materiálu se příliš nemění a její případná změna je v rozsahu chyby měření.
- Objemové hmotnosti se s užitím PCM snižují o zhruba 2%-3% na každé 1%hm. množství PCM, což je důsledek nižší objemové hmotnosti samotného Micronalu[25]. (cca 350kg/m^3)

Měření prokázalo, že přidáním PCM do běžného betonu má významný vliv na jeho finální vlastnosti. Odlišné výsledky vzešlé z měření vzorků č.1 a č.2 vnášejí jistou pochybnost zapříčiněnou nedostatkem testovacích vzorků pro podrobnější statistické vyhodnocení. (Viz. kap. 3.1)

Vzhledem k účelu, ke kterým byli jednotlivé vzorky vyhotoveny se ovšem dá přihlídnout k faktu, že byli vzorky č.1 a č.2 připraveny za odlišných podmínek. Pro další výpočty byli uvažovány hodnoty vzešlé ze sady vzorků č.2. Vzhledem ke skutečnosti, že stejná směs byla použita na experimentální model podlahy, se dá očekávat, že naměřená data budou dostatečně přesná pro použití ve výpočtovém modelu.

4.1.2 Korekce výpočtového modelu

Provedením dílčích kroků vedoucích ke zpřesnění výpočtového modelu bylo dosaženo situace, kdy porovnáním jednotlivých průběhů teplotních křivek již nelze za stávajících podmínek prohlásit, že na tyto hodnoty nemá vliv kombinace několika dílčích faktorů, jejichž ověření nebylo možné vzhledem k omezeným možnostem při zpracování této DP.

Tyto faktory jsou například:

- Přesnost měření použitých čidel
- Správně zvolený tepelný příkon topné rohože odpovídající reálnému měření
- Správně umístěné čidlo ve vrstvě (zde v akumulární vrstvě)
- Správně stanovené materiálové vlastnosti
- Závislost fyzikálních parametrů na teplotě (vlastnosti vzduchu, konstrukce)
- Špatně zjistitelné chyby ve výpočtovém modelu
- Značné zjednodušení fyzikálních přenosů tepla (sálání, konvekce, kondukce)

Nejdůležitější poznatky ze zahrnutých faktorů jsou shrnuty v následujících dvou kapitolách.

4.1.2.1 Model podlahy bez látek s fázovou přeměnou

V kap.3.3.1 byla provedena korekce výpočtového modelu za účelem jeho zpřesnění při porovnání s naměřenými daty na experimentálním modelu.

Dopad jednotlivých opatření:

- Výsledné teploty jednotlivých vrstev v ustáleném stavu odpovídají teplotám naměřeným s odchylkou zhruba 1K. Ovšem při započítání chyby měření se dá prohlásit, že tato chyba může být výrazně menší.
- Pokud bychom upravili vlastnosti betonu v simulaci, zejména jeho tepelné vodivosti, dospěli bychom nejspíš ke zpřesnění získaných výsledků při porovnání s naměřenými daty. Nelze ovšem s jistotou potvrdit, že se jedná o jediný parametr, který má na výsledné odchylky vliv. To by šlo tvrdit s jistotou pouze ve chvíli, kdy bychom znali fyzikální vlastnosti betonu zcela přesně.
- Součinitel přestupu tepla, který zejména v počáteční fázi při náběhu systému hraje významnou roli, je závislý též na proměnných fyzikálních parametrech vzduchu přímo závislých na jeho teplotě. Tyto parametry jsou ve větší míře zanedbány a je uvažováno s teplotou vzduchu $T_{\text{air}} = 20^{\circ}\text{C}$.

4.1.2.2 Model podlahy s obsahem látek s fázovou přeměnou

Materiálové charakteristiky betonu s PCM nebylo snadné určit. Tento druh stavební hmoty není u nás běžně rozšířen, ze zahraničí je zpracováno pouze pár odborných článků [13], ze kterých ovšem není vždy zcela jasné, jakým způsobem byl daný materiál vyroben a jeho vlastnosti se mnohdy významně liší dle toho, kdo danou směs připravil.

Nicméně vzhledem k problémům s měřením pomocí přístroje HFM (viz. kapitola č.3.1.2), který by dokázal měřit v rozmezí teplot bod bodem tání obsažených vosků, bylo nutné pokračovat pouze s výsledky zjištěnými méně přesným měřením přístroje Isomet 2141. Viz kap.3.1.2.

Dopad jednotlivých opatření:

- Při zavedení všech úprav jako u modelu bez PCM bylo dosaženo blízké shody s naměřenými daty. Výsledky byli dokonce přesnější vyjma čidla č. 4, které ukazovalo permanentně teplotu o 1K nižší.

- Přípuštěním faktu, že měřicí čidlo č. 4 mohlo vlivem vibrování mírně poklesnout, byla výsledná shoda teplot v průměru do 0,5K. (vrstva T4 se uvažovala jako T5 –výpočtový model)
- Vzhledem k závislosti tepelné kapacity obsažených parafínů na teplotě materiálu byl zaveden do výpočtu modul (viz. kapitola č. 2.2.1.2.), který tuto závislost dostatečně nahrazuje zjednodušeným modelem. Po jeho zavedení se projevil pokles rychlosti změny teploty materiálu při tání a tuhnutí materiálu.
- Vliv proměnné tepelné kapacity je ve výpočtu ovlivněn dvěma parametry. Prvním je počátek a konec teploty, při kterých dochází k fázové přeměně. Tím druhým pak množství energie, které je možno uložit do jednoho Kelvinu materiálu. Tzv. měrná tepelná kapacita. Tento parametr ovšem při korekci s naměřenými daty vycházel několikanásobně vyšší než by měl vycházet při porovnání s údajem výrobce.
- Dle výrobce, firmy BASF, je celková energie vložená do materiálu na celkovou přeměnu jednoho kilogramu Micronalu z pevné do tekuté fáze cirká 110kJ/kg. Při vhodném nastavení vytvořeného modelu se největší shody dosahovalo na hodnotě 610kJ/kg. Vzhledem k tomu, že model vykazoval při tomto nastavení nejlepších výsledků, a účel, ke kterému byl sestaven zcela odpovídal provedeným experimentům, bylo rozhodnuto tento model i s touto nepřesností implementovat do výsledného výpočtového modelu budovy.

4.2 Výpočetní model budovy

4.2.1 Výběr vhodného výpočetního modelu

Na základě kritérií z kapitoly 2.a výsledků simulace viz Graf. 3.22 v kapitole 3.4.1. byl vybrán model o jednom teplotním uzlu T_{ai} , který se jevil jako vhodnější z následujících důvodů:

- Čas výpočtu simulace byl zhruba dvakrát delší
- Relativně snadná orientace v jednotlivých modulech
- Přesnost výsledků podobná modelu s dvěma teplotními uzly
- Modifikovatelnost modelu

Vzhledem k povaze této práce nelze jednoznačně určit, který model dává přesnější výsledky. V běžných případech je dle [18] přesnější model o dvou teplotních uzlech, a to zejména schopností simulovat vliv přenosu tepla sáláním a konvekcí blíže realitě (přenos sáláním na povrch konstrukce a následnou konvekcí z těchto povrchů).

Ovšem tento model není primárně vyzkoušen na prostory s vytápěnou podlahou. Vzhledem k větší složitosti modelu bylo proto rozhodnuto, že pro potřeby této práce bude dostačující zjednodušený model, který je též lépe pochopitelný z hlediska jeho fungování a je možné ho snadněji upravovat, a to zejména v případě úpravy regulace vytápění a diagnostiky jednotlivých parametrů (teploty konstrukcí, tepelné toky atd.)

4.2.2 Zjednodušení výpočtového modelu

4.2.2.1 Přenos tepla

Z fyzikálního hlediska je nutno výpočtové modely vždy zjednodušit tak, abychom byli schopní jednotlivé kroky probíhající v modelu dostatečně pochopit a určit silné a slabé stránky takového řešení. V případě modelu zde použitého je několik faktorů, které je nutné brát na vědomí při vlastním vyhodnocení naměřených dat:

- Ve výpočtech je zcela zanedbán přenos a vliv vlhkosti na konstrukce a vnitřní teplotu vzduchu. Parametry všech materiálů a vnitřního prostředí jsou konstantní.
- Jedinými proměnnými v modelu jsou teplotní uzly a parametr součinitele přestupu tepla podlahy.
- Přestup tepla je na vnější straně konstrukcí uvažován konstantní.
- Přestup tepla vnitřních konstrukcí je vyjma podlahy také konstantní s rozlišením pro orientaci předpokládaného tepelného toku z budovy do exteriéru.
- Teplota zeminy je uvažována konstantní hodnotou 9°C, která přibližně odpovídá průměrné roční teplotě exteriéru. Zastavěná plocha je ovšem velmi malá, tudíž dochází k prochlazování zeminy po obvodu.
- Sálání ploch vůči okolí je uvažováno pouze formou součinitele přestupu tepla. Vnější vliv například nočního sálání vůči obloze je zanedbáno úplně.
- Výsledná teplota vnitřního prostředí je teplota, která odpovídá přibližně dokonale promíchanému objemu vzduchu v budově. Není uvažováno s tepelnou kapacitou vnitřních konstrukcí. Tudíž výsledná tepelná stabilita prostoru může být mírně lepší z hlediska teplotních výkyvů.
- Není hodnoceno tepelné sálání od chladných povrchů stěn a oken. V případě dobře zateplených budov je ovšem teplota vzduchu blízká teplotě okolních povrchů a tudíž lze zanedbat.

4.2.2.2 Z hlediska provozu budovy

Zejména z hlediska spotřeby energií v zimě a přehřívání budovy v létě má největší vliv chování uživatelů budovy. Zahrnutí takového chování do výpočtového modelu je ovšem značně složité. Vlivy, které jsou zanedbány, ale z hlediska dopadu na výsledné teploty a potřeby energií mohou být významné, jsou:

- Intenzita větrání budovy dle přítomnosti osob zejména v zimních měsících
- Vnitřní tepelné zisky závislé na aktuální přítomnosti osob a jejich činnosti
- Manuální/automatické ovládání stínících prvků – žaluzií
- Nárazové větrání okny
- Změna teploty, na kterou je nastaven termostat vytápění

Všechny tyto činnosti mohou výrazně ovlivnit výsledné hodnoty teplot a potřeby energií. Z hlediska posouzení vlivu akumulčních podlah na výslednou teplotu a potřebu tepla ovšem mohou být zanedbány.

V případě, že by byly prováděny simulace za účelem zjištění co nejreálnějších spotřeb energie během určitého období, tak by tyto vlivy měli zásadní vliv na výsledné hodnoty a bylo by je třeba zahrnout.

Výjimkou je zde zejména noční větrání v letních měsících, které může být přínosné z hlediska vybití akumulční podlahy v nočních hodinách. Vzhledem k vysoké tepelné kapacitě je pro nutné pro správné zajištění funkce akumulční podlahy odvést tuto tepelnou zátěž mimo budovu.

4.3 Posouzení vlivu akumulční podlahy na tepelnou bilanci budovy

Tato kapitola je věnována rozboru výsledků, které byly zjištěny při simulaci celoročního provozu budovy s akumulční podlahou, jejíž přínosy budou dále rozebrány z hlediska dopadu na celkovou potřebu tepla na vytápění v zimním období a z hlediska dopadu na tepelnou stabilitu a komfort při užívání budovy zejména v letním období.

4.3.1 Zimní provoz – potřeba tepla na vytápění

Původní myšlenkou a důvodem zpracování této práce bylo posoudit, zda jsme schopni s vynaložením běžně dostupných prostředků vybudovat domov, který bude schopný pokrýt své potřeby čistě z elektrické energie vyrobené alternativním způsobem bez zapojení externích konvenčních zdrojů.

Již od počátku bylo více či méně zřejmé, že bez vynaložení velkého množství počátečních investic nebude něco takového možné. I přesto lze stanovit několik závěrů, které mohou posloužit jako základ pro další zkoumání.

Vliv okrajových podmínek

- Lokalita, kde byl umístěn model budovy odpovídá svými teplotními a slunečními parametry vyšším polohám kolem města Prahy. Z této skutečnosti je důležité vycházet pro pochopení všech souvislostí. Tato oblast je jak z hlediska teplot, tak z hlediska slunečního svitu spíše nadprůměrná s výjimkou oblasti Jižní Moravy. Viz kap. 2.3.2
- Použitá data pro výpočet v porovnání s průměry dané oblasti jsou spíše podprůměrné, tedy méně slunečního svitu a nižší teploty během roku
- Celková účinná plocha PV panelů je 50m², což odpovídá zhruba 34ks panelů umístěných na střeše s výkonem 7,6kWp při účinnosti přeměny solární energie 15,2%. Instalace je tudíž v dnešních poměrech spíše nadprůměrná, ovšem odpovídající reálným možnostem. Viz kap.
- Ve výpočtu je zanedbána klesající účinnost vlivem změny teploty panelů a jejich stárnutí.

Pokrytí potřeby tepla

- Výsledné pokrytí potřeby tepla na vytápění je při využití čistě sluneční energie zcela nedostatečné. Od listopadu do února dalšího roku se průměrně denní teploty v interiéru pohybují od 10°C během prosince a ledna do 16°C v listopadu a únoru, bez dodatečného zdroje tepla.
- Zisky ze sluneční radiace skrz jižně orientované prosklené výplně se podílejí na celkové tepelné bilanci zhruba 30% celkové využitelné energie na vytápění. Také však způsobují výrazné výkyvy teplot během dne v budově.
- Zhruba stejnou velikostí dodané energie se podílí na vnitřní zisky od osob a vybavení domu.
- Z fotovoltaických panelů je v průběhu roku využita část dodané energie na pokrytí tepelných ztrát vnitřního prostředí. V tab. Tab. 4.1. jsou shrnuty jednotlivé poměry dodané energie ku energii potřebné k pokrytí dalších tepelných ztrát.

Tab. 4.1 Využitelnost sluneční energie při bivalenci s externím zdrojem

Model podlahy	Topná rohož	Externí zdroj	Pokrytí PV
REF	926 kWh	1487 kWh	63%
PCM	962 kWh	1427 kWh	67%
REF-5	788 kWh	1812 kWh	43%

Největší účinnosti z hlediska využitelnosti solárních zisků jeví podlaha obsahující látky s fázovou přeměnou. Faktory, které na to mají největší vliv jsou:

- Vlivem tání parafinů v betonové vrstvě je při stejném množství dodané energie vnitřní teplota vrstev nižší – a tedy dochází k menším tepelným ztrátám podlahou.
- Vlivem vyšší tepelné kapacity teplota v interiéru je stabilnější a s menšími teplotními výkyvy. Díky průměrně nižší teplotě během dne dochází ke spínání vnitřního regulačního termostatu pracující na principu ON/OFF regulátoru.

Efektivní využití dostupných zdrojů

Po provedení vyhodnocení využití jednotlivých zdrojů energie se dá prohlásit, že objekt za současného návrhu na plno nevyužívá svůj potenciál. V Tab. 4.2 jsou shrnuty měsíční úhrny slunečního svitu dopadnuvší na účinnou plochu panelů. Ve druhém řádku je pak celková energie využitelná po vynásobení účinností panelů $\eta=0,152$. Porovnáním hodnot s celkovým příkonem elektrické energie v závislosti na regulaci teploty v budově lze dospět k závěru, že v zimním období i přes velmi nízkou teplotu v budově není využito naplno solárního záření. Vlivy, které se podílejí na této bilanci jsou:

- Jednoduchá regulace ON/OFF reagující na aktuální teplotu v prostoru. Vzhledem k souběhu slunečních zisků okny a napájení fotovoltaických panelů, dochází k lokálnímu přehřátí interiéru a pozastavení dodávek energie.
- Instalací topné rohože o maximálním výkonu 66W/m² je v případě vyššího dostupného aktuálního výkonu omezen tento výkon na tuto hodnotu.
- Nastavení teplot na termostatu externího zdroje na zapnutí při nižší teplotě vzduchu tak, aby nedošlo k přebírání funkce primárního zdroje tepla – topné rohože.

Tab. 4.2 Využitelnost výkonu PV panelů pro vytápění topnou rohoží

Měsíc	Úhrn sol. zisků na plochu 45°	Úhrn sol. zisků využitelný	Příkon do top. rohože	Využití
Leden	1256,5	191,0	131,7	69%
Únor	2842,9	432,1	209,8	49%
Březen	4578,5	695,9	268,0	39%
Duben	6098,5	927,0	139,2	15%
Květen	6844,3	1040,3	63,8	6%
Červen	7114,0	1081,3	34,0	3%
Červenec	7567,3	1150,2	0,0	0%
Srpen	6923,0	1052,3	0,0	0%
Září	4728,3	718,7	7,7	1%
Říjen	3278,5	498,3	125,4	25%
Listopad	1560,1	237,1	108,0	46%
Prosinec	1207,2	183,5	99,5	54%
Suma	53999	8208	1187	

Využití betonu s PCM

Fakta o využití PCM z hlediska využitelnosti energií:

- Potřeba tepla na vytápění se snížila vlivem PCM o 1% z celkové energie 2413kWh na 2389kWh za rok. Jedná se o součet energie z akumulární podlahy a dodatečného zdroje tepla z varianty 4.1.
- Použitím Micronalu jako plniva do betonu se zlepšilo využití fotovoltaiky z hlediska akumulace energie o 3,8% z původních 1143kWh/rok na 1187kWh/rok. Zde se jedná zejména o stabilizaci teplotních výkyvů vnitřního prostředí a tedy častější spínání termostatu.

Ekonomické zhodnocení:

- Roční úspora v energiích 24kWh celkově
- 60kWh ročně uspoříme na lepší využitelnosti energie z fotovoltaiky. Při ceně 5kč za 1kWh je potenciální úspora 300kč.

Posouzení vlivu tloušťky akumulární vrstvy

Ačkoliv vliv rozdílných složení směsí akumulární vrstvy nemá výrazný vliv na celkové potřeby a spotřeby energie v budově, změnou tloušťky akumulární vrstvy u referenčního modelu ze 200mm na pouhých 50mm bylo změřeno a vyhodnoceno následující:

- Potřeba tepla na vytápění se zvýšila vlivem menší tloušťky akumulární vrstvy o 7.2% z celkové energie 2413kWh/rok na hodnotu 2601kWh/rok. Jedná se o součet energií z akumulární podlahy a dodatečného tepla dle varianty 4.1.
- Využití fotovoltaiky se zhoršilo z hlediska celkového množství uloženého do akumulární vrstvy o 16,5% z původních 955kWh/rok na 1143 kWh/rok. To je zapříčiněno zejména rychlejším náběhem systému podlahového vytápění a předáním velké části svého výkonu v krátké době do interiéru budovy, což má za následek zvýšení jeho teploty a vypnutí vytápění podlahy.
- Poměr mezi využitou energií z PV a externího zdroje poklesl o 20% z původních 63% na 43% (viz. Tab. 4.1).

Ekonomické zhodnocení:

- Roční úspora v energiích při zachování původní akumulární vrstvy 188kWh celkem
- 325kWh ročně uspoříme na energiích z doplňkového zdroje tepla při využití akumulární podlahy. Při ceně 5kč za 1kWh je potenciální úspora 1625kč/rok.

4.3.2 Letní provoz – vyhodnocení tepelného chování

V předchozí kapitole byl zhodnocen zejména vliv konstrukce podlahy na celkovou potřebu tepla na vytápění. Tyto energie je nutné řešit zejména v zimním období, kdy jsou vnější teplota a sluneční zisky na velmi nízkých úrovních. V těchto měsících nedochází ve většině případech k nadměrnému přehřívání interiéru a teplota v místnosti se v případě správného navržení otopné soustavy pohybuje s mírnou odchylkou poblíž nastavené teploty vytápění.

V době od května do září se ovšem tepelné zisky stávají mnohdy tepelnou zátěží, která negativně ovlivňuje teplotu vzduchu v interiéru. Vzhledem k užití akumulární podlahy pro vytápění a akumulaci tepelné energie v zimním období je vhodné posoudit její vliv na vnitřní prostředí také v letním období.

Vliv okrajových podmínek

- Použité okrajové podmínky odpovídají svým teplotním charakterem spíše mírně chladnějšímu létu, kdy průměrná teplota v měsíci Srpen je o 2-3°C nižší jak průměry za posledních 5 let. (Viz. kap. 2.3.2.2)
- Celkové množství slunečního záření dopadající na horizontální rovinu je v průměru celého roku nižší než je průměr. (Viz. kap. 2.3.2.2)
- Prosklené výplně jsou umístěny pouze na jižní stěnu budovy, plocha oken je 13,6m². Není uvažováno s aktivním stínícím prvkem, a součinitel stínění je uvažován hodnotou 0,9 pro vliv ostění a rámu.

Vliv slunečního záření na celkovou tepelnou bilanci

Na Graf. 3.26 a Graf. 3.25 lze vypočítat, že sluneční zisky hrají nezastupitelnou úlohu při celkové tepelné bilanci budovy. V Tab. 4.3. jsou shrnuty tyto poměry pro variantu 4.1. při simulaci reálného provozu budovy. Nejvýraznější vlivy slunečního záření jsou tyto:

- Krátkodobé přehřívání interiéru v přechodném období Jaro a Podzim.
- Vlivem kolmějšího dopadu slunečních paprsků jsou sluneční zisky v Březnu (207kWh) vyšší než za stejně dlouhé období v Srpnu (185kWh), přitom Srpen 234 slunečních dnů oproti Březnu 139 slunečních dnů, pokud porovnáme údaje pro Brno 2008 [24].
- V případě úplného odstínění slunečních zisků v létě bychom nemuseli řešit přehřívání interiéru. Teplota interiéru v měsíci Srpen při variantě 1.1 bez vnitřních zisků poklesne na hodnotu 20°C. Přičemž vnitřní tepelné zisky jsou zhruba srovnatelné se zisky slunečními. (Viz. např. Tab. 3.12)
- Bez jakýchkoliv tepelných zátěží se průměrná teplota v Srpnu drží na 16,7°C, přičemž průměrná teplota venkovního vzduchu je 17,6°C (Viz. Tab. 2.11). Což je zapříčiněné jednak tepelnou setrvačností budovy, ale také částečnou ztrátou skrz podlahu do země.
- Naopak při plném zatížení vnitřního prostředí slunečními zisky vystoupá průměrná teplota v Srpnu na hodnotu 24,3°C u referenčního betonu.

Tab. 4.3 Podíl vytápění a ostatních tepelných zisků budovy

Varianta	Sluneční zisky	Vnitřní zisky	Vytápění
REF 4.1	30%	31%	40%
PCM 4.1	30%	31%	39%
REF5 4.1	29%	30%	41%

Posouzení vlivu aplikace látek s fázovou přeměnou

Primární využití těchto látek, bez výjimky právě Micronalu [25] od společnosti BASF využitého pro účely této práce, je zvýšení akumulačních schopností konstrukcí proti letnímu přehřívání. Z toho důvodu je vhodné popsat jejich potenciál v případě použití v akumulační podlaze.

Důležitou podmínkou správné funkčnosti je:

- Vhodně navržené umístění akumulačního materiálu, a to zejména kvůli absorpci a následnému uvolnění nahromaděné energie. Z tohoto pohledu se akumulační podlaha jeví jako vhodné řešení v případě působení sluneční radiace, která následně ohřívá tuto hmotu přímo.
- V použitém modelu č.1 o jednom teplotním uzlu je ovšem tento jev zcela zanedbán, a všechny tepelné zátěže vstupují přímo do teplotního uzlu modelu. V případě vhodně zvoleného modelu by mohlo docházet k větší tepelné stabilizaci díky lepšímu přenosu ze slunečního záření přímo do konstrukce.
- Z hlediska uvolnění nahromaděné energie je vhodné umístění akumulační podlahy na zemi díky tepelným ztrátám v letním období skrz izolační vrstvu. Ovšem tato výhoda se v zimním období stává nevýhodou. Tepelná ztráta v zimním období je zároveň díky natápění (a zvyšování teploty) této vrstvy logicky vyšší díky většímu tepelnému toku.
- Dále je výhodné využívat nočního větrání, které zajistí lepší odvod tepelné energie do vnějšího prostředí, a to zejména díky vyššímu přestupu tepla do vzduchu při vyšších rychlostech proudění větracího vzduchu. Tento efekt je též v této práci zcela opomenut.

S přihlédnutím k těmto poznatkům jsou dále prezentována fakta o výsledcích ve vztahu k tepelné stabilitě budovy zejména v letním období.

První způsob hodnocení je založený na četnosti překročení teplot zvolených na základě tepelného komfortu člověka dle kap. 2.3.5.2.

- V Tab. 4.4 jsou shrnuty četnosti překročení nebo podkročení nastaveného rozpětí tepelného komfortu. Toto rozpětí je nastaveno na teplotu T_{ai} od 19°C do 25°C. Detailnější rozbor v kap. 3.6.1.3
- Vyjma konstrukce REF-5 s nižší akumulací vrstvou můžeme pozorovat, že v případě užití látek s fázovou přeměnou mírně zlepšujeme vnitřní tepelnou stabilitu a četnost překročení teplot vnitřního uzlu T_{ai} přes 25°C mírně klesne.
- Nejviditelnější je tento vliv v srpnu, kdy také jsou nejvyšší teploty venkovního vzduchu a teplota vnitřního interiéru tak dosahuje svých maxim. Pro tuto chvíli se projeví nejvíce pozitivní vlastnosti tohoto řešení.
- V případě konstrukce REF-5 vidíme značné zhoršení vnitřní stability. Měsíc srpen vykazuje o 9% vyšší nárůst počtu překročení oproti variantě s PCM.

Tab. 4.4 Četnost překročení tep. komfortu v letním období

19°C-25°C	REF	PCM	REF-5
Květen	98,3%	99,4%	88%
Červen	99,1%	100,1%	94%
Červenec	98,5%	99,5%	87%
Srpen	69,4%	74,1%	65%
Září	97,2%	97,1%	96%
Říjen	100,0%	100,0%	100%
Průměr	93,8%	95,0%	88,5%

- Přepočteme-li celkovou četnost na dny v měsíci, kdy dochází k překročení teploty 25°C, získáme hodnoty uvedené v Tab. 4.5
- Rozdíl mezi modely s PCM a bez PCM je 2,3dny.

Tab. 4.5 Počet dnů za rok nad 25°C

Období	REF	PCM	REF-5
Květen - Říjen	9,6 dnů/rok	7,3 dnů/rok	19,3 dnů/rok

Jako druhý způsob hodnocení vlivu akumulací podlahy s PCM lze porovnat nejvyšší a nejnižší teploty, kterých bylo dosaženo ve stejném období. Souhrn jednotlivých maxim a minim uveden v Tab. 3.15.,

- Nejvyšších teplot v průběhu roku je dosaženo v měsíci srpen, kdy teplota dosahuje v případě modelu bez PCM teploty 28,1°C. To je hodnota, která již nevyhoví ani z hlediska tepelně technických předpisů [3], kde je požadavek stanoven na 27°C.
- V případě použití PCM se teplota sice sníží, ale stále se drží nad hranicí 27°C, přesněji na hodnotě 27,8°C, což činí pokles o 0,3°C neboli o 1,2%.
- V případě nejnižší vnitřní teploty se hodnotí varianta č.3.1, u které lze lépe pozorovat vliv akumulací schopnosti na pokles teploty v době, kdy není dostatek energie na vytápění.
- Posuzovaný měsíc leden se vyznačuje velmi nízkými solárními zisky a nejnižšími venkovními teplotami z celého roku. V Tab. 3.10 lze jednoduše dohledat, že pro tento měsíc je také

nejvyšší potřeba tepla na vytápění – 611kWh energie z celkových 2717kWh, tedy 22,5% z celého roku.

- Ve variantě 3.1 se zapnutou topnou rohoží, ovšem bez dodatečného tepelného zdroje se nejnižší teplota v případě použití betonu bez PCM dostane až na hodnotu 6,5°C, což je zajiště teplota, kterou nelze považovat za dostatečnou z hlediska tepelného komfortu.
- Důležité je ovšem srovnání s teplotami v případě srovnání s betonem s PCM. V tomto případě teplota dosahuje 6,4°C, což je rozdíl pouhých 0,1°C.
- V případě průměrných teplot za měsíc leden u betonu s PCM je hodnota 9,76°C oproti hodnotě 9,79°C u běžného betonu. V tomto případě je rozdíl podobný, a to 0,03°C.
- Zde je patrné, že při nízkých tepelných ziscích, zejména krátkodobě působícího (solární záření) se vliv vyšší tepelné kapacity téměř vytrácí. To je způsobeno zejména tím, že veškerá energie je okamžitě využita na zvýšení vnitřní teploty vzduchu, a samotná teplota akumulací vrstva má teplotu velice podobnou nebo dokonce vyšší jak teplota vzduchu. (Viz. Graf. 3.29)
- Naopak v letních měsících při nadměrné tepelné zátěži se teplota povrchu akumulací podlahy pohybuje většinou pod hodnotou teploty vzduchu, a tudíž dochází k přenosu tepla ze vzduchu do akumulací hmoty. (Viz. Graf. 3.30)

Tab. 4.6 Nejnížší a nejvyšší teploty v roce

Období	REF	PCM	REF-5
Srpen (var. 4.1)	28,1	27,8	29,7
Leden (var.3.1)	6,5	6,4	3,2

Vliv tloušťky akumulací vrstvy

Výhody akumulací podlah se projeví zejména ve chvíli, kdy zbytek konstrukce domu je z materiálů o nízké objemové hmotnosti. To se týká zejména dnes moderních dřevostaveb, a také modelu zde použitého. Za těchto podmínek je změna z tloušťky 200mm na pouhých 50mm vcelku zásadní změnou, která ovlivní chování tepelné stability vnitřního prostředí zejména v letním období.

Výsledkem simulací při porovnání modelu s běžným betonem o různých tloušťkách je:

Letní období

- V letním období nedostatek akumulací hmoty zapříčiní, že při déletrvajícím tepelném zatížení bez dostatečné regenerace hmoty dochází k výraznějšímu přehřívání. V modelu zde prezentovaném to lze ukázat zejména na Graf. 3.32.
- Vlivem solárního záření dochází k výraznějšímu nárůstu teploty zejména v době, kdy se venkovní teplota pohybuje na úrovni teploty vnitřní a chybějící hmoty zapříčiní, že vzduch a konstrukce postupně navyšují svou vnitřní teplotu mnohem rychleji.
- Teplota vzduchu v období od 7.8 do 9.8 (Viz. Graf. 3.32) v případě modelu bez akumulací vrstvy REF-5 dosahuje 29,7°C, zatímco u původního modelu se teplota dostane „pouze“ na hodnotu 28,1°C. To je 5,2%, přičemž v případě užití betonu s PCM až o 6,3%, pokud bereme v úvahu, že při 5cm betonu s PCM by vliv přidaných látek byl nejspíš zanedbatelný.(Viz. Tab. 4.6)
- Po tomto období postupně teplota v interiéru klesá, ovšem v případě modelu bez akumulací vrstvy ještě několik následujících dní zůstává vyšší v důsledku vysoké teploty okolních konstrukcí, které za předcházející období navýšili výrazně vnitřní energii a tedy i teplotu. U modelu REF teplota v interiéru je zhruba o 0,5°C nižší.
- V období od 19.8 do 22.8 dojde k poklesu venkovní teploty. Zároveň s tím dochází k výraznějšímu poklesu vnitřní teploty u modelu REF-5 díky nedostatku akumulací hmoty. V tomto případě ovšem výsledné teploty mluví ve prospěch této konstrukce,

jelikož teplota zde poklesne na přijatelnější hodnoty od 22°C do 24°C na rozdíl od modelu REF, kde teplota poklesne pouze na úroveň 23°C až 25,5°C (21.8).

- V následujícím období si lze povšimnout, že díky postupnému poklesu venkovní teploty (Viz. Graf. 3.28.) dochází k rychlejšímu poklesu teploty modelu REF-5, zatímco model s akumulační vrstvou svou vnitřní energii ztrácí výrazně pomaleji.

Zimní období

Je nutno poznamenat, že se jedná o posouzení varianty 3.1. s vytápěním pomocí fotovoltaických panelů bez dodatečného zdroje energie. Tato varianta se ovšem hodí pro představu o tom, jak tato konstrukce funguje v těchto kritických momentech.

- V zimním období se projeví výrazně vliv akumulační hmoty při náhlých poklesech venkovní teploty spolu s minimálními tepelnými zisky. (Viz. Graf. 3.31)
- Minimální teplota zde u modelu REF-5 dosáhne 3,2°C, zatímco u modelu REF teplota poklesne na hodnotu 6,5°C, což je zhruba o 50% lepší výsledek.
- V období od 1.2 do 10.2 lze pozorovat, že teploty u modelu REF-5 vyšší v důsledku minimální energie uložené v akumulační podlaze. Tudíž teplota u REF modelu vystoupá na nižší teplotu, ovšem její následný pokles je také výrazně nižší. Zhruba 1°C (3.2) oproti 2,5°C u REF-5.
- V období od 10.2 do 19.2 je období vyšších solárních zisků, kdy dochází k postupnému nabití akumulační podlahy. Venkovní teploty v tomto období klesají výrazně pod bod mrazu. (Viz. Graf. 3.27.)
- Teploty vnitřních uzlů zde jsou v obou případech velmi podobné a během dne a noci klesají v průměru o 6,5°C. V případě modelu REF je to zejména vlivem vyšší teploty akumulační hmoty podlahy a menšího tepelného toku do této konstrukce zapříčiněného vlivem menšího rozdílu teplot.
- V období od 19.2 až do 26.2 dojde k výraznému poklesu solárního záření a venkovní teploty se pohybují mírně pod bodem mrazu. V této situaci se začne výrazně projevovat tepelná kapacita akumulační vrstvy.
- Teploty u obou modelů začínají klesat. U modelu s akumulační vrstvou je ovšem výrazně nižší pokles teploty hmoty podlahy a tudíž dochází k většímu přenosu energie mezi povrchem a vnitřním teplotním uzlem. V nejnižším bodě činí rozdíl 3,2°C ve prospěch akumulační podlahy.

ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly sestaveny dva experimentální modely akumulční podlahy, na nichž bylo provedeno měření a ověření funkčnosti výpočetního modelu, který byl dále využit ve výpočetním modelu budovy. Tento výpočetní model byl založen na metodě analogie s elektrickým proudem. Pomocí tohoto modelu bylo provedeno několik celoročních simulací, které dále posloužily k vyhodnocení vlivu akumulční podlahy (včetně implementace látek s fázovou přeměnou) na vnitřní tepelnou stabilitu uvažované budovy. Dále byl posouzen vliv na celkové potřeby tepelné energie na vytápění.

Experimentální model podlahy

Zhotovený experimentální model byl navržen tak, aby koncepčně odpovídal skutečné akumulční podlaze. V jednotlivých vrstvách byl osazen čidly, která zaznamenávala průběh teplot v reálném čase. Pro umístění modelu byla vybrána hala Univerzitního centra v Buštěhradě, kde následně byla provedena měření pro ověření teplotního chování.

Z provedených zkoušek tepelně-technických a mechanických vlastností na vzorcích betonů vytvořených za účelem zhotovení experimentálního modelu podlahy bylo zjištěno, že u směsi běžného betonu jsme dosáhli výrazně vyšších pevností oproti betonu s přidaným PCM [25]. Pokles pevnosti v tlaku zde oproti referenčnímu betonu byl až poloviční v případě porovnání s 4% PCM. U pevnosti v tahu za ohybu byl výsledný pokles u stejné varianty zhruba o třetinu. Nutno dodat, že navržená směs není zcela optimální z hlediska jejího složení. Výsledné parametry pevnosti v tahu za ohybu jsou na hraně použitelnosti betonové mazaniny [8]. Případná úprava receptury založená na větším množství provedených měření, a jejich následném vyhodnocení by ovšem tyto nedostatky byla s velkou pravděpodobností schopna vyřešit.

Z hlediska tepelně-technických vlastností navržená receptura referenčního betonu vykazuje překvapivě vysoké hodnoty tepelné vodivosti – $2,2\text{W/m}^2\text{K}$ oproti normovým $1,23\text{W/m.K}$ [2]. U betonu s 4% PCM tepelná vodivost poklesne na hodnotu $1,65\text{W/m.K}$, avšak stále je o zhruba 30% vyšší.

Výpočetní model - obecně

Pro vyhodnocení celoročních simulací bylo nutné zvolit vhodný výpočetní model budovy. Tento model byl sestaven ve výpočetním programu Matlab a jeho grafické nástavbě Simulink.[35] Pro účely této práce byli naprogramovány dva typy modelů – jednoduzlový model [23], který pracuje na principu přímého propojení vnějších konstrukcí na vnitřní teplotní uzel a dále dvouuzlový model [18], který poměrově rozděluje tepelný tok na sálavou a konvekční složku. Vzhledem k výpočetní náročnosti a větší nepřehlednosti ve fungování jednotlivých systémů dvouuzlového modelu byl pro následná vyhodnocení vybrán model jednoduzlový.

Výpočetní model podlahy

Na základě získaných dat z experimentálního modelu byla následně provedená zpětná korekce výpočetního modelu podlahy, který je součástí jednoduzlového modelu budovy. Nejvýznamnější vliv na zpřesnění výsledků simulace mělo zahrnutí proměnného součinitele přestupu tepla. Procentuálně se po jeho zavedení odchylka snížila o 30% až 70% v závislosti na stavu modelu (náběh, ustálení, vybíjení). V případě modelu podlahy s PCM bylo také nutné zavést náhradní „trojúhelníkovou“ závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [17]. Takto se dosáhlo výrazného zpřesnění, ovšem za cenu nejasně definované měrné tepelné kapacity těchto látek. Při integraci této veličiny podle teploty od počátku do konce fázové přeměny se celková uložená latentní energie nerovná hodnotě 110kJ/kg látky udávána výrobcem [25], nýbrž hodnotě 610kJ/kg látky. K řešení tohoto problému by bylo zapotřebí další podrobné měření a ověření výpočtového modelu. Vzhledem k prokazatelnému pozitivnímu vlivu na výsledný průběh teplot bylo i přesto opatření implementováno do komplexního výpočtového modelu objektu.

Výpočetní model budovy

Vzhledem k nutnosti zjednodušit výpočetní model jsou zcela zanedbány přenosy tepla sáláním, a výsledná teplota vnitřního uzlu T_{ai} zastupuje teplotu v celém objemu budovy, tudíž nezohledňuje lokální rozdíly teplot. Ke značnému zjednodušení došlo také na úrovni systémů budovy, například není řešeno ovládání stínění budovy na základě tepelných zátěží či je zcela zanedbán vliv proměnných tepelných zisků v průběhu dne.

Celoroční simulace

Ze zveřejněných výsledků simulace byla provedena konečná analýza opírající se zejména o možnost porovnat dva validované výpočetní modely akumulární podlahy. Vzhledem ke stejným počátečním a okrajovým podmínkám při výpočtu celoroční simulace modelu mohlo dojít k porovnání rozdílů zejména vnitřního tepelného uzlu T_{ai} při použití dvou typů betonové směsi.

Z těchto simulací vyplynulo, že z hlediska potřeb tepla na vytápění se příliš neliší, zda se aplikuje PCM do betonu či nikoliv. Pozitivní přínosem je jisté zvýšení akumulární schopnosti bez zvyšování teploty hmoty, čímž se mírně zvyšuje účinnost využití solárních zisků a klesají tepelné ztráty do země. Přínos je ovšem jen kolem 4% celkové dodané energie z fotovoltaických panelů. Z hlediska tepelné stability se mírně zlepšil tepelný komfort z hlediska četnosti překročení teploty 25°C v interiéru. Ovšem v celoročním srovnání je to pouze o 2,3 dnů oproti běžnému betonu.

Dále byl porovnán vliv tloušťky akumulární vrstvy, přičemž tato simulace měla poskytnout obecný vhled na problematiku dřevostaveb s nízkou tepelnou kapacitou. Zároveň s tím ovšem bylo potřeba zachovat funkční systém elektrického podlahového vytápění. Bylo provedeno posouzení při snížení celkové tloušťky podlahy na 50mm z původních 200mm. Z hlediska celkových potřeb energií došlo k navýšení celkové potřeby tepla na vytápění o 7%. Zároveň došlo k výraznému zhoršení tepelného komfortu, kdy došlo k navýšení počtu dnů s teplotou překračující 25°C o zhruba 10 dní za rok na celkových 19 dnů.

Při vyhodnocování těchto poznatků také byla objasněna otázka, zda jsme schopni za určitých podmínek udržet teplotu vnitřního prostředí na přijatelné úrovni tepelného komfortu. Z hlediska potřeby tepla na vytápění se dosáhlo nejlépe 67% pokrytí ze solárních zisků. Z hlediska teplotního chování to ovšem v prosinci a lednu znamenalo, že teplota v interiéru se pohybovala kolem 10°C, a to jistě není dostatečné.

Doporučení

Na základě zkušeností získaných při vyhodnocování jednotlivých variant se nutně naskytne mnoho dalších otázek, které chtějí být vyřešeny. Ty nejzásadnější, které se již v této práci nestihly vyřešit se dají shrnout takto:

- Ověření modelu na základě porovnání (komparace) s ostatními simulačními nástroji
- Ověření vlastností betonu s PCM na základě detailnějšího zkoumání
- Vylepšit efektivitu využití solárních zisků ze slunce zahrnutím preciznější regulace vytápění – například dle prediktivní předpovědi či na základě aktuální teploty akumulární vrstvy
- Zahrnout do systému vytápění využití nočního proudu pro zlepšení ekonomiky provozu
- V letním období zahrnout do systému regulace noční větrání pro eliminaci naakumulované energie od solárních zisků. S tím souvisí také změna součinitele stínění v letním období pro snížení tepelné zátěže

POUŽITÉ ZDROJE

Zákony, vyhlášky, normy směrnice

- [1] **ČSN 73 0540-4** *Tepelná ochrana budov: Část 4: Výpočtové metody*. PRAHA: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005, 59 s.
- [2] **ČSN 73 0540-3** *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. PRAHA: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2011, 96 s.
- [3] **ČSN 73 0540-2** *Tepelná ochrana budov: Část 2: Požadavky*. PRAHA: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2011, 54 s.
- [4] **ČSN 73 0548**. *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostor*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1985, 30 s.
- [5] **ČSN EN ISO 6946**, *Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*
Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2007, s. 28.
- [6] **ČSN EN ISO 7730**, *Ergonomie tepelného prostředí 6 Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2006, s. 48.
- [7] **ČSN EN 13892-2**, *Metody zkoušení potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku*
PRAHA: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003, 8 s.
- [8] **ČSN 744505**, *Podlahy – společná ustanovení*
Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2012, s. 28.

Literatura

- [9] **MICHEJEV, Michail Aleksandrovič**. *Základy sdílení tepla*. PRAHA: PRŮMYSLOVÉ VYDAVATELSTVÍ, 1952. Knižnice energetického průmyslu.
- [10] **Hagentoft, C., E.**, *Introduction to Building Physics*, Studentlitteratur, 2001. ISBN: 91-44-01896-7
- [11] **ŠNITA, Dalimil**. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN: 80-7080-589-7.
- [12] **CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL**. *Větrání a klimatizace*. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: Bolit-B press, 1993, 490 s. Česká matice technická (Bolit-B press). ISBN 80-901574-0-8
- [13] **Hunger, M., Entrop, A.G., I.Mandilaras, H.J.H.Brouwers, Founti, M.**
The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. Publikováno na: *Cement and concrete composites* 31, 2009
- [14] **SVOBODA, Luboš**. *Stavební hmoty*. 3. vydání, Praha: Jaga Group s.r.o., 2013, 950 s. ISBN: 978-80-260-4972-2
- [15] **Fořt, Jan., Trník, A., Pavlík, Z.**
Influence of PCM Admixture on Thermal Behavior of Composite Plaster
Publikováno na: *Special Concrete and Composites* 2014
- [16] **Páleníček, Ondřej**. *Systém pro dlouhodobý záznam, vizualizaci a vyhodnocení energetických dat budovy*
Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce: Jan Včelák
- [17] **Hájek, Karel**. *Akumulace tepla ve stavebních prvcích obsahující materiály se změnou skupenství*
Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Stavební. Vedoucí práce: Pavel Kopecký

- [18] **Kopecný, Pavel.**
Comparative testing of simplified lumped parameter building thermal models
Publikováno v rámci : Mezinárodní konference - CESB13, 2013

Elektronické zdroje

- [19] **Ing. Milan Ostrý, Ph.D., Ing. Roman Brzoň, Ing. Tomáš Klubal,**
Pasivní chlazení v letním období s využitím akumulace tepla při změně skupenství
[online, dne 7.4.2016] dostupné na: www.tzb-info.cz
- [20] **Ing. Renata Straková**
Elektrické primotopné rohože nejen jako hlavní zdroj ale i komfortní doplněk pro vytápění
[Online, dne 16.4.2016] dostupné na: www.tzb-info.cz
- [21] **HOLEČEK, Oldřich; ŠNITA, Dalimil.**
11 Sdílení tepla.
[Online, dne 1.1.2017] dostupné na: www.tzb-info.cz
- [22] **KOPECKÝ, Pavel**
Stavební tepelná technika, Praha 2014
[Online, dne 1.1.2017]
dostupné na: <https://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=people&id=26>
- [23] **KOPECKÝ, Pavel**
Matematické modelování ve stavební fyzice, YMMS: Sborník přednášek
[Online, dne 1.1.2017]
dostupné na: <https://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=people&id=26>
- [24] **TREALS MP**
Doba slunečního svitu v Brně [.JPG]
[Online, dne 1.1.2017] dostupné na: <http://www.treals.cz/fotovoltaika/vyklad-pojmu/>
- [25] **BASF spol. s r.o.**
Informace o produktu Micronal na stránkách výrobce
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <https://www.basf.com/cz/cz.html>
- [26] **Fenix Group a.s.**
Informace o produktu ADPSV 10W/m na stránkách výrobce
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <http://www.fenixgroup.cz/cs/produkty/topne-kabely-pro-poloakumulacni-vytapeni>
- [27] **Dallas Semiconductor Corp.**
Informace o produktu DS18B20
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>
- [28] **Fotovoltaika v podmínkách ČR**
Roční úhrn slunečního záření [.JPG]
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [29] **OnlineTechnology**
Informace o produktu SDS Micro DIN E R2
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <https://www.i4wifi.cz/LAN-10-100-1G/Monitorovaci-modul-SDS-MICRO-DIN-E-R2-2x-rele-LAN-PWM-vystup-3x-OPTO-vstup.html>
- [30] **Conrad s r.o. - Voltcraft**
Informace o produktu Energy Logger 4000
[online, dne 21.12.2016] dostupné na: <http://www.voltcraft.cz/meric-spotreby-elektricke-energie-energy-logger-4000.k125335>

- [31] **Applied Precision Ltd.**
Informace o měřícím zařízení ISOMET 2104
[online, dne 12.10.2016] dostupné na: <http://www.appliedp.com/en/isomet.htm>
- [32] **Linseis Inc.**
Informace o měřícím zařízení HFM lambda
[online, dne 12.10.2016] dostupné na: <https://www.linseis.com/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/hfm-heat-flow-meter/>
- [33] **Matyášek, Jiří. Suk, Miloslav**
Přírodní energetické zdroje
[online, dne 1.1.2017] dostupné na:
<http://is.muni.cz/elportal/estud/pedf/js10/antropog/web/pages/3-1-zdroje-energie.html>
- [34] **Topinfo s.r.o.**
Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla
[online, dne 12.10.2016] dostupné na: <http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>

Použitý software

- [35] **The mathWorks, Inc.**
Matlab [software].
Verze: R2015b
Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [36] **Microsoft, s.r.o**
Microsoft Excel - Tabulkový výpočtový program [software].
Verze: 2013
- [37] **K-CAD spol. s r.o.**
Tepelná technika 2015 CZ – Area 2015 EDU [software].
Dostupné na: <http://kcad.cz/cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ

Zkratky

OZE	- Obnovitelné zdroje energie
VZT	- Vzduchotechnická jednotka
ZZT	- Zpětné získávání tepla
PCM	- Materiál s fázovou přeměnou (z angl.: Phase change materials)
m. n. m	- Metrů nad mořem
UCEEB	- Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

Fyzikální veličiny

Q	- měrná produkce tepla [W]
P	- Příkon [W]
U	- součinitel prostupu tepla [W/m ² K]
R	- tepelný odpor [m ² K/W]
m	- hmotnost [kg]
n	- násobnost výměny vzduchu [h ⁻¹]
A	- plocha [m ²]
t	- čas [s], teplota [°C]
V	- objemový průtok [m ³ /h]
ε	- emisivita [-]
ρ	- hustota vzduchu [kg/m ³]
φ	- relativní vlhkost [%]
I	- Intenzita sluneční radiace [W/m ²]
α	- Pohltivost, slun.azimut
f	- pevnost

Indexy

a	- air (vzduch)
i	- interiér
e	- exteriér
l	- letní období
z	- zimní období
s	- povrch konstrukce
t	- latentní teplo
k	- konstrukce
w	- okno
or	- sluneční radiace oknem
rm	- rovníkový sluneční teplota
Q	- tepelná zátěž
ef	- efektivní (účinná)
ck	- pevnost v tlaku
ctm	- pevnost v tahu za ohybu

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky

Obr. 1.1. Princip akumulace latentního tepla při fázové změně [19]	12
Obr. 1.2 Schéma jednodílného modelu	17
Obr. 2.1 Příprava zkušebních vzorků pro ověření vlastností aku. betonu	19
Obr. 2.2 Rozložení teplot při ustáleném stavu v exp. modelu – Area 2015 [37]	21
Obr. 2.3 Výrobní schéma experimentálního modelu vč. umístění měřících čidel	22
Obr. 2.4 Ukázka z přípravy experimentálního modelu – topný kabel a betonáž	22
Obr. 2.5 Schéma průběhu experimentálního měření aku. podlahy	24
Obr. 2.6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě u látek PCM	26
Obr. 2.7 Grafická podoba závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě v Simulinku	26
Obr. 2.8 Model přestupu tepla konvekcí	27
Obr. 2.9. Výpočet konstant kritériálních rovnic	27
Obr. 2.10. Výpočet podobnostních čísel kritériálních rovnic v Simulinku	28
Obr. 2.11. Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním v Simulinku	28
Obr. 2.12 Model podlahy v Simulinku	29
Obr. 2.13 Roční úhrn slunečního záření pro Českou republiku [28]	34
Obr. 2.14 Vizualizace simulovaného objektu	35
Obr. 2.15 Půdorys simulovaného objektu	35
Obr. 3.1 Vliv PCM na změny mechanických vlastností (Hunger, 2009) [13]	45
Obr. 3.2 Měření mechanických vlastností v Experimentálním centru ČVUT	46

Tabulky

Tab. 1.1 Součinitele přestupu tepla dle ČSN	13
Tab. 1.2 Konstanty pro výpočet kritériálních rovnic	14
Tab. 2.1 Vlastnosti látek s fázovou přeměnou – Micronal DS	18
Tab. 2.2 Poměry jednotlivých složek určených pro testovací vzorky	19
Tab. 2.3 Ověření teploty v ustáleném stavu exp. modelu	21
Tab. 2.4 Složení receptury u vzorků č.2 a potřebný objem směsi	23
Tab. 2.5 Parametry experimentálního modelu	30
Tab. 2.6 Parametry vzduchu [34]	30
Tab. 2.7 Odchyly měření použitých přístrojů	30
Tab. 2.8 Odchyly při měření - varianty	31
Tab. 2.9 Varianty chyby měření	31
Tab. 2.10 Zeměpisné umístění lokality	32
Tab. 2.11 Průměrné hodnoty solárního záření a venkovní teploty po měsících	33
Tab. 2.12 Meteorologická data	34
Tab. 2.13 Obálka budovy – výpočet	37
Tab. 2.14 Tepelné zisky a ztráty – měsíční metoda	38
Tab. 2.15 – Výpočet potřeby tepla na vytápění – měsíční metoda	38
Tab. 2.16 Varianty tepelných toků pro posouzení bilance budovy	43
Tab. 3.1 Podrobné výsledky měření mechanických vlastností vzorků č.1 a č.2	46
Tab. 3.2 Shrnutí z měření mechanických vlastností vzorků č.1 a č.2	47
Tab. 3.3 Tepelně technické vlastnosti – celkový souhrn vzorků č.1 a č.2	48

Tab. 3.4 Souhrn tepelně technických vlastností vzorků č.1 a č.2	49
Tab. 3.5 Průměrné odchylky REF modelu – experiment č.1. v.2	56
Tab. 3.6 Průměrné odchylky REF modelu – experiment č.2. v.2	56
Tab. 3.7 Průměrné odchylky PCM modelu – experiment č.1. v.2	60
Tab. 3.8 Průměrné odchylky PCM modelu – experiment č.2. v.2	60
Tab. 3.9 Průměrné odchylky při měření – exp. č.1	61
Tab. 3.10 Potřeba tepla na vytápění objektu	64
Tab. 3.11 Varianty tepelných toků pro posouzení bilance budovy	65
Tab. 3.12 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF	66
Tab. 3.13 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – PCM	67
Tab. 3.14 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF-5	69
Tab. 3.15 Nejnižší a nejvyšší měsíční teploty pro var 3.1 a 4.1	74
Tab. 4.1 Využitelnost sluneční energie při bivalenci s externím zdrojem	85
Tab. 4.2 Využitelnost výkonu PV panelů pro vytápění topnou rohoží	86
Tab. 4.3 Podíl vytápění a ostatních tepelných zisků budovy	88
Tab. 4.4 Četnost překročení tep. komfortu v letním období	89
Tab. 4.5 Počet dnů za rok nad 25°C	89
Tab. 4.6 Nejnižší a nejvyšší teploty v roce	90

Grafy

Graf. 2.1 Průběh venkovních teplot a solárního záření během roku	33
Graf. 3.1 Mechanické vlastnosti vzorků č.1	47
Graf. 3.2 Mechanické vlastnosti vzorků č.2	47
Graf. 3.3 Experiment č.1 – reálná data_ měření č.1	51
Graf. 3.4 Experiment č.1 – reálná data_ měření č.2	51
Graf. 3.5 Experiment č.2 – reálná data_ měření č.1	52
Graf. 3.6 Experiment č.2 – reálná data_ měření č.2	52
Graf. 3.7 REF model podlahy bez korekce – exp. č.1.	53
Graf. 3.8 REF model podlahy bez korekce – exp. č.2.	53
Graf. 3.9 REF model podlahy s korekcí T_{ae} – exp. č.1.	54
Graf. 3.10 REF model podlahy s korekcí T_{ae} – exp. č.2.	54
Graf. 3.11 REF model podlahy s korekcí α_{si} – experiment č.1.	55
Graf. 3.12 REF model podlahy s korekcí α_{si} – experiment č.2.	55
Graf. 3.13 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – REF exp. č.1	56
Graf. 3.14 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – REF exp. č.2	56
Graf. 3.15 PCM model podlahy bez korekce – experiment č.1.	57
Graf. 3.16 PCM model podlahy bez korekce – experiment č.2.	57
Graf. 3.17 PCM model podlahy s korekcí fázové přeměny – experiment č.1	58
Graf. 3.18 PCM model podlahy s korekcí fázové přeměny – experiment č.2	58
Graf. 3.19 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – PCM exp. č.1	59
Graf. 3.20 Odchylka výpočtového modelu od exp. modelu – PCM exp. č.2	60
Graf. 3.21 Posouzení chyby měření u experimentu č.1	61
Graf. 3.22 Posouzení modelů	63
Graf. 3.23 Potřeba tepla na vytápění - simulace	63
Graf. 3.24 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF	66
Graf. 3.25 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – PCM	67

<i>Graf. 3.26 Podíl tepelných toků v budově – Var.4.1 – REF-5.....</i>	<i>69</i>
<i>Graf. 3.27 Průběh teplot v závislosti na různých variantách tepelných zisků – Zimní období (Leden)</i>	<i>75</i>
<i>Graf. 3.28 Průběh teplot v závislosti na různých variantách tepelných zisků – Letní období (Srpen)</i>	<i>75</i>
<i>Graf. 3.29 Porovnání průběhů teplot T_{ai} v zimním období - PCM/REF</i>	<i>76</i>
<i>Graf. 3.30 Porovnání průběhů teplot T_{ai} v letním období - PCM/REF.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf. 3.31 Vliv tloušťky akumulční vrstvy na teplotu T_{ai} v zimním období</i>	<i>78</i>
<i>Graf. 3.32 Vliv tloušťky akumulční vrstvy na teplotu T_{ai} v letním období.....</i>	<i>79</i>

PŘÍLOHY

- PŘÍLOHA Č. 1: Souhrn potřeb tepla na vytápění dle variant pro model REF
- PŘÍLOHA Č. 2: Souhrn potřeb tepla na vytápění dle variant pro model PCM

Varianta REF	Hodnota:	Jedn.	Výpočtový měsíc														
			Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec			
Varianta 0.1	Tepelné zisky	(kWh)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	864,7	800,4	672,2	485,7	305,3	199,2	140,5	131,5	284,1	487,5	697,8	768,1			
	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			
	T _a 0.1	(°C)	0,6	0,2	3,1	6,8	12,5	14,1	15,6	16,7	13,2	9,4	4,5	1,6			
Varianta 1.1	Tepelné zisky	(kWh)	87,4	179,9	206,5	195,4	139,9	109,7	135,2	185,3	183,7	102,6	91,6				
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	777,3	620,5	465,6	290,3	165,4	89,5	5,3	0,0	101,3	303,8	595,1	676,6			
	%	90%	78%	69%	60%	54%	45%	4%	0%	0%	36%	62%	85%	88%			
	T _a 1.1	(°C)	2,1	4,4	7,5	11,7	16,2	16,9	18,6	20,6	17,8	13,6	7,7	3,6			
Varianta 2.1	Tepelné zisky	(kWh)	247,1	324,1	366,2	350,0	299,6	264,3	294,9	345,0	343,4	257,2	250,0				
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	617,6	476,2	305,9	135,7	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	144,1	440,6	518,2			
	%	71%	60%	46%	28%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	63%	67%			
	T _a 2.1	(°C)	5,8	8,1	11,2	15,4	19,9	20,6	22,3	24,3	21,5	17,3	11,4	7,3			
Varianta 3.1	Tepelné zisky	(kWh)	373,2	544,6	589,6	480,7	350,3	283,7	294,9	345,0	447,9	366,5	369,8				
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	491,4	255,8	82,6	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	331,3	398,3			
	%	57%	32%	12%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	47%	52%			
	T _a 3.1	(°C)	9,8	15,5	19,5	20,9	21,5	21,6	22,7	24,3	21,9	20,1	15,5	11,0			
Varianta 4.1	Tepelné zisky	(kWh)	808,7	731,2	599,6	486,8	353,0	283,6	294,9	345,0	465,5	641,1	730,2				
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	55,9	69,2	72,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,1	56,7	38,0			
	%	6%	9%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	8%	5%			
	T _a 4.1	(°C)	19,8	20,0	20,3	20,9	21,5	21,6	22,7	24,3	21,9	20,4	19,9	19,8			
Varianta 0.2 (referenční)	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	864,7	800,4	672,2	485,7	305,3	199,2	140,5	131,5	284,1	487,5	697,8	768,1			
	T _a 0.2	(°C)	20,1	20,1	19,9	19,8	19,6	19,5	19,5	19,6	19,6	19,8	20,0	20,0			

Příloha. 1 Potřeba tepla na vytápění REF

Varianta PCM	Hodnota:	Jedn.	Výpočtový měsíc													
			Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec		
Varianta 0.1	Tepelné zisky	(kWh)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	864,4	800,9	671,4	483,8	304,4	197,9	140,2	130,0	284,1	487,8	697,4	767,8		
	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
Varianta 1.1	Tai 0.1	(°C)	0,5	0,1	3,1	6,8	12,5	14,1	15,6	16,7	13,2	9,4	4,4	1,6		
	Tepelné zisky	(kWh)	87,4	179,9	206,5	195,4	139,9	109,7	135,2	185,3	182,8	183,7	102,6	91,6		
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	777,0	621,0	464,8	288,4	164,5	88,2	4,9	0,0	101,3	304,1	594,8	676,2		
Varianta 2.1	%	(-)	90%	78%	69%	60%	54%	45%	4%	0%	36%	62%	85%	88%		
	Tai 1.1	(°C)	2,1	4,4	7,6	11,7	16,2	16,9	18,6	20,5	18,0	13,6	7,6	3,6		
	Tepelné zisky	(kWh)	247,1	324,1	366,2	350,0	299,6	264,3	294,9	345,0	337,4	343,4	257,2	250,0		
Varianta 3.1	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	617,3	476,7	305,1	133,9	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	144,4	440,2	517,8		
	%	(-)	71%	60%	45%	28%	2%	0%	0%	0%	0%	30%	63%	67%		
	Tai 2.1	(°C)	5,8	8,1	11,3	15,4	19,8	20,6	22,0	24,1	21,9	17,6	11,4	7,3		
Varianta 4.1	Tepelné zisky	(kWh)	373,2	551,0	603,5	475,4	351,5	291,8	294,9	345,0	343,6	449,1	367,0	369,8		
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	491,1	249,9	67,9	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,7	398,0		
	%	(-)	57%	31%	10%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	52%		
Varianta 0.2 (referenční)	Tai 3.1	(°C)	9,8	15,6	19,6	20,7	21,4	21,7	22,8	24,2	22,0	20,2	15,7	11,0		
	Tepelné zisky	(kWh)	810,5	723,0	596,0	483,9	351,3	291,8	294,9	345,0	343,6	460,6	635,5	731,7		
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	53,9	77,9	75,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,2	36,0		
Varianta 0.2 (referenční)	%	(-)	6%	10%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	9%	5%	
	Tai 4.1	(°C)	19,8	19,9	20,1	20,8	21,4	21,7	22,8	24,2	22,0	20,3	19,8	19,8		
	Potřeba tepla na vytápění	(kWh)	864,4	800,9	671,4	483,8	304,4	197,9	140,2	130,0	284,1	487,8	697,4	767,8		
T _a 0.2	(°C)	20,1	20,1	19,9	19,8	19,6	19,5	19,5	19,4	19,6	19,8	20,0	20,0			

Příloha. 2 Potřeba tepla na vytápění PCM