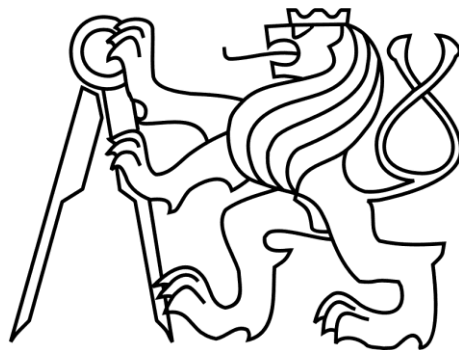


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA POZEMNÍCH STAVEB



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

### TEPELNĚ VLHKOSTNÍ CHOVÁNÍ VERTIKÁLNÍ ZAHRADY

Vypracoval: Bc. Josef Haber

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Studijní obor: Budovy a prostředí

Praha 2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Haber Jméno: Josef Osobní číslo: 437982  
Zadávací katedra: K 124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb  
Studijní program: B - Budovy a prostředí  
Studijní obor: Budovy a prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tepelně vlhkostní chování vertikální zahrady

Název diplomové práce anglicky: Hygro-thermal performance of vertical greenery

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce se bude soustředit na dva hlavní cíle. Prvním je zpracování a vyhodnocení dat naměřených na experimentální vertikální zahradě, zrealizované na UCEEB ČVUT v Buštěhradě. Hlavním cílem je vyhodnocení teplotních a vlhkostních parametrů a jejich změna v průběhu sezónního vegetačního cyklu. Druhým cílem diplomové práce je modelování tepelně vlhkostního chování vertikální zahrady včetně porovnání s měřenými údaji.

Diplomová práce by měla obsahovat tyto body:

- 1) Stručná rešerše tématu vertikálních zahrad
- 2) Analýza měřených údajů z vertikální zahrady s cílem vyhodnotit teplotní a vlhkostní parametry s přihlédnutím k sezónnosti prvku
- 3) Tepelně vlhkostní model vertikální zahrady

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.1.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 18.5.2020  
*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“.*

31.1.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21.5.2020

.....

Josef Haber

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Kopeckému, Ph.D. za vedení, rady, věcné připomínky a trpělivost, které mi věnoval v průběhu psaní této práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Pavle Nedbalové, Bc. Kateřině Hasalové a Bc. Ondřeji Zlámalovi za bezvadnou korekturu. Závěrem bych chtěl poděkovat rodičům za jejich flegmatický přístup k mému studiu.



TEPELNĚ VLHKOSTNÍ CHOVÁNÍ VERTIKÁLNÍ  
ZAHRADY

HYGRO-THERMAL PERFORMANCE OF VERTICAL  
GREENERY

# Abstrakt

Diplomová práce se zabývá měřeními daty na experimentálních fasádách zkonstruovaných na UCEEB ČVUT, se zvláštním důrazem na testovací pole osazená vertikální zahradou. Současný trend snižování dopadu globální klimatické krize nutí stavební průmysl aplikovat na obálky novostaveb obdobné zelené konstrukce a tato práce přináší díky kvantifikaci naměřených hodnot a vytvořeným prediktivním modelům kromě nových poznatků i možnost optimalizovat budoucí realizace a provoz vertikálních zahrad. První část práce se zabývá vodní bilancí vertikální zahrady. Nejprve byla prostudována data, ze kterých byly extrahovány reálné hodnoty nutné závlahy. Následně byl vytvořen prediktivní model založený na násobné lineární regresi, který s průměrnou chybou  $0,5 \text{ l/m}^2$  za den predikoval v letních měsících závlahu pouze z předpovědi počasí. Jako vedlejší produkt byl také vytvořen upravený Bristow-Campbell model, který z rozdílu denní minimální a maximální teploty venkovního vzduchu předpovídá denní dávku ozáření libovolně natočené fasády. Druhá část práce se zaměřila na porovnání jednotlivých variant halových fasád, přičemž hlavním zjištěním je, že při dobře navržené vnitřní halové stěně jsou benefity vertikální zahrady i provětrávané dutiny pro vnitřní prostředí minimální. Závěrečná část práce se zaměřila na možné zjednodušení už existujících fyzikálních komplexních simulačních modelů vertikálních zelených zahrad pomocí statistického modelu teploty vzduchu ve větrané dutině. Výsledné jednoduché regresní modely dokázaly s určitými omezeními předpovědět hodinové hodnoty teploty ve větraných dutinách s koeficientem determinace, který neklesl v průběhu 8 měřených měsíců pod 90 %.

## Klíčová slova

zelená fasáda, vertikální zahrada, halová fasáda, provětrávaná fasádní dutina, dvouplášťová konstrukce

# Abstract

The diploma thesis aims to examine collected data from experimental façades tested at UCEEB CTU, focusing mainly on testing fields with living walls. The need to deal with global climatic crisis urges building industry to apply green solutions on building envelopes. This thesis introduces new information and possibilities to optimise future realisations and operations of living walls, with quantification of measured values and newly developed predictive models. First part of the thesis focuses on water balance of the living walls. Firstly, data from measurements were collected and evaluated, with outcome of calculated hourly quantity of evapotranspirated water. A predictive model of irrigation was developed, with average error of 0,5 l/m<sup>2</sup> per day in summer days, based on the common weather forecast. As a side product, variation of Bristow-Campbell model of solar radiation estimation was developed. The model is capable of predicting daily solar irradiation of arbitrarily turned plane based on the difference between daily maximal and minimal temperatures. The second part of this thesis aims to compare and evaluate differences between measured experimental industrial façades. Key finding of this part is, that, with well-designed inner wall, the behaviour of each exterior façade solution has marginal effect on interior environment. The objective of last part of this thesis was to analyse the possibility of developing simpler statistical model, that could substitute existing complex physical simulation models of living wall. The resulting model, based on multiple linear regression predicted, however with certain limitations, required hourly values of temperatures in a ventilated air gap of the façades, with a coefficient of determination not decreasing below 90% during 8 months of measuring.

## Keywords

vertical greenery system, living wall, industrial and storage façades, ventilated air gap, double skin construction

# Obsah

1	Úvod .....	7
1.1	Současný stav problematiky.....	7
1.1.1	Historický vývoj vertikálních zahrad.....	7
1.1.2	Typologie zelených fasád a zatřídění vertikální zahrady .....	8
1.1.3	Vlastnosti vertikálních zahrad .....	9
1.2	Cíle práce .....	12
2	Experimentální fasáda .....	13
2.1	Tepelně vlhkostní parametry testovaných fasád.....	15
2.2	Senzory a jejich umístění v testovaných fasádách .....	16
3	Vodní bilance vertikální zahrady.....	18
3.1	Úvod.....	18
3.2	Výpočet evapotranspirace.....	19
3.2.1	Chladící schopnost fasády .....	22
3.3	Model odhadu evapotranspirace .....	23
3.3.1	Metoda násobné lineární regrese .....	23
3.3.2	Datové soubory .....	24
3.3.3	Výpočetní programy a statistické vyhodnocení .....	28
3.3.4	Vypočtené hodnoty regresních parametrů.....	29
3.4	Jednoduchý prediktivní algoritmus závlahy.....	36
3.4.1	Predikce denní dávky solárního záření.....	36
3.4.2	Predikce závlahy z předpovědi teploty venkovního vzduchu.....	43
3.5	Shrnutí kapitoly .....	48
4	Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla.....	50
4.1	Úvod.....	50
4.2	Porovnání naměřených hodnot.....	50

4.2.1	S1 vs. S2 – tradiční řešení a výhody větrané dutiny.....	51
4.2.2	S2 vs. S3 – vliv vertikální zahrady na větranou dutinu.....	53
4.2.3	Vliv na vnitřní prostředí budovy.....	57
4.2.4	Součinitel prostupu tepla obvodové konstrukce.....	64
4.3	Shrnutí kapitoly .....	73
5	Zjednodušený model pro teplotu vzduchu v dutině .....	75
5.1	Úvod.....	75
5.2	Regresní model teploty vzduchu v dutině .....	76
5.3	Verifikace regresního modelu .....	78
5.4	Shrnutí kapitoly .....	81
6	Závěr.....	82
6.1	Shrnutí zjištěných poznatků.....	82
6.2	Zhodnocení práce a možné budoucí výzvy .....	84
7	Citovaná literatura .....	86

## Značení veličin a jednotky

Symbol	Popis	Jednotka
$\Delta m_w$	rozdíl hmotností vody v substrátu .....	[kg/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_b$	rozdíl od termického vztlaku .....	[Pa]
$\Delta p_f$	rozdíl tlaku od vazkého tření .....	[Pa]
$\Delta p_l$	rozdíl tlaku od místních ztrát .....	[Pa]
$\Delta p_w$	rozdíl tlaku od proudění větru .....	[Pa]
$\Delta t$	rozdíl času mezi měřeními .....	[čas]
$d$	šířka vrstvy .....	[m]
$g_e$	odpar vody evaporací .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$g_{et}$	odpar vody evapotranspirací .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$G_{Gt}$	solární ozáření určité roviny .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{Gh}$	solární ozáření horizontální roviny .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$g_{in}$	přítok vody do vertikální zahrady .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$g_{out}$	odtok vody z vertikální zahrady .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$g_r$	vlhkostní zisky od deště .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$g_t$	odpar vody transpirací .....	[kg/(m <sup>2</sup> čas)]
$H_{eh}$	dávka extraterestriálního sol. záření na horizont .....	[Wh/m <sup>2</sup> čas]
$H_{et}$	dávka extrater. solárního ozáření na určitou rovinu .....	[Wh/m <sup>2</sup> čas]
$H_{gh}$	dávka solárního ozáření na horizontální rovinu .....	[Wh/m <sup>2</sup> čas]
$H_{Gt}$	dávka solárního ozáření na určitou rovinu .....	[Wh/m <sup>2</sup> čas]
MABE	vážená absolutní chyba .....	[podle veličiny]
MAPE	vážená procentuální absolutní chyba .....	[%]
$q$	hustota tepelného toku .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{fol}$	hustota tep. toku na sádrokartonovém záklopu .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{sdke}$	hustota tep. toku na vnější paropropustné folii .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$R^2$	koeficient determinace .....	[-]
$R$	tepelný odpor .....	[m <sup>2</sup> K/W]
$RH$	relativní vlhkost .....	[%]
$S_d$	ekvivalentní difuzní tloušťka .....	[m]
$T_{ae}$	průměrná teplota v exteriéru .....	[°C]
$T_{ae,max}$	maximální teplota v exteriéru .....	[°C]
$T_{ae,min}$	minimální teplota v exteriéru .....	[°C]
$T_{cav}$	teplota v provětrávané dutině .....	[°C]
$T_{fol}$	teplota na vnější paropropustné folii .....	[°C]
$U$	součinitel tepelné vodivosti .....	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$Z$	difuzní odpor .....	[čas/m]
$Z_{v,e}$	difuzní odpor na přestupu na exteriérový vzduch .....	[čas/m]
$Z_{v,kokos}$	difuzní odpor kokosového obalu .....	[čas/m]
$Z_{v,rostlina}$	difuzní odpor vegetace .....	[čas/m]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti .....	[W/(mK)]
$\rho$	objemová hmotnost .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{v,ae}$	koncentrace vodní páry v exteriérovém vzduchu .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{v,sat,ae}$	nasycená koncentrace vodní páry v ext. vzduchu .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{v,sat,sub}$	nasycená koncentrace vodní páry v substrátu .....	[kg/m <sup>3</sup> ]

# 1 Úvod

Obálky budov s instalovanou vegetací se díky společenskému tlaku, jenž vyžaduje ekologičtější stavební řešení, pomalu dostávají do širšího povědomí zahraničních i českých investorů. Zároveň prostor střech a fasád skýtá pro architekty lákavé místo pro realizaci moderních a zajímavých řešení. Intenzivní a extenzivní zelené střechy se už staly poměrně běžnou variantou střešního pláště, modernější a z hlediska gravitačních a přírodních zákonů problematičtější vertikální zahrady teprve hledají v současné době své místo na větších realizacích. Tato práce by měla přispět k odborné debatě, která se okolo tématu vertikálních zahrad rozvinula, a snad i nabídnout odpovědi na některé otázky, které stavební průmysl a odborná veřejnost pokládá vědeckým týmům, jež se touto problematikou zabývají.

## 1.1 Současný stav problematiky

### 1.1.1 Historický vývoj vertikálních zahrad

První důkazy o aplikaci vegetace na fasádě se dají nalézt přibližně 500 let před naším letopočtem [1]. Ve středověku bylo zvykem vyvazovat vinnou révu a některé ovocné stromy na opěrné stěny [2]. O prvních realizacích zelených fasád se dá nicméně uvažovat až na přelomu 19. a 20. století, kdy se stalo běžným zvykem v některých anglosaských zemích vysazovat popínavé břečťany na perimetr budovy [1]. S přelomem 19. století taktéž začal poměrně značný rozvoj městské zahradní kultury. Zajímavé je zjištění, že v registru knihovny zahradní historie, který vytvořila berlínská Universität der Künste, je možné najít mezi lety 1880 až 1940 pod klíčovým slovem zelené fasády skoro 200 článků z podstatných zdrojů té doby. Podle stejného klíče je možno nalézt pouze 19 článků se slovem zelené střechy [1] [3].

První vertikální zahradu zkonstruoval brazilský zahradní architekt Roberto Burle Marx [2]. Na projektu se taktéž podílel v současnosti již legendární švýcarský architekt a urbanista Le Corbusier, který jako pátý a poslední hlavní bod své příručky moderní architektury označil právě vegetaci, přesněji zelené střechy [4]. Prvním nalezeným patentovým řešením je modulární systém cihel vyplněných zeminou, který podal profesor zahradní krajinné architektury Stanley Hart White z Univerzity v Illinois v roce 1937 [5] [6].

V posledních 30 letech, kdy ve společnosti rezonuje potřeba po implementaci vegetace do intravilánu měst, se zelená fasádní řešení začínají objevovat častěji. Dají se taktéž najít

## 1 Úvod

i první větší realizace vertikálních zahrad. Jedním z hlavních popularizátorů těchto řešení je botanik Patrick Blanc, který si nechal patentovat několik interiérových a exteriérových variant vertikálních zahrad. V současnosti se může pyšnit přibližně třemi stovkami úspěšných realizací živých stěn po celém světě a spoluprací s nejpřednějšími soudobými architekty [2] [7].

Nicméně vývoj se u vertikálních zahrad nezastavil a je mnoho dalších možností, jak ozelenit fasádu. Nejprogresivnějším je pravděpodobně myšlenka takzvaných vertikálních lesů, kterou prosazuje architektonická společnost Stefano Boeri Architetti. Tento moderní přístup k návrhu fasády, kdy jsou na perimetr budovy umístěny květináče, které jsou součástí nosné konstrukce a ve kterých jsou zasazeny až 9 metrů vysoké stromy. Návrhy takových budov jsou pojaty vsutku holisticky, od samotného zavlažování, jež je zakomponováno do jádra budovy, až po výběr rostlin a jejich následnou údržbu z jeřábu, umístěného na střeše budovy. [8]

Česká architektura byla v době vývoje vertikálních zahrad ve druhé polovině dvacátého století z větší části postižena politickým systémem, který nebyl vývoji a aplikaci takovýchto staveb příliš nakloněn. Nicméně po Sametové revoluci, a hlavně v několika posledních letech, se situace mění. V Česku vyrostlo několik různých staveb, které koncept vertikální zahrady využívají. Jako příklad by mohl posloužit projekt AFI Business Centre na pražském Karlíně či modelová hala brněnské firmy LIKOS, která je první zelenou halovou stavbou svého druhu na světě [9] [10].

### 1.1.2 Typologie zelených fasád a zatřídění vertikální zahrady

Existuje několik různých přístupů, které se snaží varianty zelených fasád zatřídít do uceleného systému. Pro tuto práci bude využit asi nejpoužívanější, který zelené fasády rozděluje na extenzivní zelené stěny a intenzivní vertikální zahrady. Jak je vidět, v českém prostoru se ustálila duplicita u pojmu zelená fasáda, která často vytváří nejistotu, o jakém typu fasády je ve skutečnosti řeč [11]. Je proto dobré zmínit i anglický ekvivalent, kdy je zelená fasáda, jako nadřazený název pro jakýkoli vegetací porostlý vertikální prvek obálky budovy, nazývána vertical greenery system (VGS). Tyto systémy jsou poté rozděleny na green facades (extenzivní zelené fasády) a living walls (vertikální zahrady). [12] [13] [14] V posledních letech se taktéž začíná vytvářet nová skupina zelených fasád, a to vertikální lesy (vertical forests) [8].



## 1 Úvod

Extenzivní zelené fasády se dají definovat jako takové fasády, které využívají přirozeného chování popínavých rostlin. Rostou ze substrátu, který je přímo před objektem, nebo z uměle vyvýšených květináčů [14]. Jejich typickou nevýhodou je doba, která musí být fasádě věnována, než vyrostou do požadované podoby [2]. Extenzivní fasády se dále člení na dva typy. Prvním je tradiční, kdy si rostlina sama nachází úchyty ve fasádě (typicky břečtan). Druhou a náročnější variantou je fasáda s podpůrnými systémy, kdy rostlina neroste přímo po povrchu fasády, ale typicky po ocelových sítích či mřížích [12] [13].

Intenzivní vertikální zahrady jsou typické tím, že médium, ze kterého vegetace roste, je umístěné vertikálně po celé ploše fasády. Tyto systémy jsou osazené umělým zavlažováním, protože úhrn srážek na svislou plochu nebývá dostatečný. Zároveň, jak název napovídá, jsou z hlediska provozu náročnější na péči než typ předchozí a jsou celkově výrazně dražší [14]. Jejich nespornou výhodou je okamžitý estetický efekt, protože tyto fasády bývají montované s již vzrostlou vegetací. Tyto fasády mohou být členěné podle typu média (povětšinou se jedná o substrát či nějaký hydroponický systém), nebo podle jejich umístění v budově, tedy na vertikální zahrady exteriérové a interiérové. [2] Třetí možností, jak vertikální zahrady členit, je podle jejich ukládání na fasádu, tedy zda se jedná o fasádu modulární, či plošnou. [2] [12] [13] Výhodou modulárního systému je, že v případě úhynu určité části fasády se poškozený panel jednoduše vymění.

### 1.1.3 Vlastnosti vertikálních zahrad

Společně s aplikací vertikálních zahrad se množí otázky, které je třeba zodpovědět. Nejzásadnější je kvantifikace benefitů, které toto fasádní řešení skýtá pro člověka a okolní prostředí. Ekologové, ekonomové a stavební fyzici z celého světa se snaží hlouběji porozumět komplexní problematice těchto systémů, aby poskytli ucelenější pohled na výhody a nevýhody vertikálních zahrad.

Pérezova přehledová studie [12] shrnula současné poznání z hlediska tepelně-technických vlastností zelených fasád. Z 25 výzkumů, které se věnovaly tomuto tématu, se jich 8 věnovalo přímo vertikálním zahradám. Bylo zjištěno, že zkoumané fasády ochladily prostor v letních měsících o 12-20,8 °C. 6 z 8 výzkumů bylo provedeno v prostředí C dle Köppena klasifikačního prostředí, tedy v oblasti mírného klimatu. Zbývající dva byly provedeny v prostředí ekvatoriálním. Je ale nutno dodat, že z 8 zkoumaných výzkumů byl pouze jeden proveden na reálné stavbě s vertikální zahradou,

## 1 Úvod

ostatní byly buďto experimenty (5 výzkumů), či simulace (2 výzkumy). Měření reálné fasády proběhlo v Nizozemí v roce 2011 a testovalo vertikální zahradu o tloušťce substrátu 22 cm. Fasáda byla natočena na západ. Během podzimního měření byl naměřen pokles teploty za vertikální zahradou 5 °C [15].

Vertikální zahrady byly taktéž analyzované z hlediska akustických vlastností. Bylo zjištěno, že zvuková pohltivost substrátu není lineárně závislá na tloušťce substrátu. Nejvyšší nárůst nastává v prvních 5 cm, kdy se koeficient pohltivosti dostává na hodnotu 0,9 [16]. Ve stejné práci bylo taktéž zjištěno, že při použití vertikální zahrady o rozměru 10,08 m<sup>2</sup> klesne v dozvučné místnosti o podlahové ploše 211 m<sup>2</sup> u většiny frekvencí doba dozvuku na polovinu. Další práce potvrzují vysokou schopnost těchto fasád moderovat dobu dozvuku v místnostech [17] [18]. Práce [16] taktéž porovnávala pohltivost vertikální zahrady s ostatními běžnými materiály, přičemž vertikální zahrada vyšla z tohoto srovnání jako jedna z nejlepších možných variant pro snížení doby dozvuku. Je otázkou, jaký má vertikální zahrada vliv na dobu dozvuku a obecně na pohlcování hluku v exteriéru. Taktéž byla analyzována neprůzvučnost této konstrukce. Výsledný index vážené neprůzvučnosti byl naměřen až 18 dB v interiérových podmínkách typickým testem neprůzvučnosti [16]. V jiné práci přineslo měření v exteriéru na betonové stěně rozdíl pouhých 2 dB [18]. Obě studie [16] [18] se ale shodly na tom, že výsledné hodnoty nejsou nikterak závratné. Pro srovnání, běžná cihla má při šířce 10 cm neprůzvučnost 44 dB.

Rozhodně zajímavější je vliv vertikálních zahrad na biosféru a obecně ekologii. Potenciálních benefitů by se dalo najít hned několik. Jeden z nejdiskutovanějších je potlačování vlivu takzvaného městského tepelného ostrova, kdy v oblasti vysoké míry zástavby stoupá lokálně teplota nad hodnotu okolního průměru. Právě vertikální zahrady by díky schopnosti evapotranspirace (změny vody na vodní páru) a malým prostorovým nárokům na zastavené území mohly být nástrojem, jak tento jev nepřímo spjatý s globálním oteplováním snížit [13].

Taktéž by instalací vertikálních zahrad byla podporována biodiverzita v městském prostoru. Kromě samotné vegetace totiž vertikální zahrada poskytuje potravu, přirozenou ochranu a obydlí pro hmyz a menší ptáky [13]. Je prokázáno, že úbytek hmyzu o alarmujících 25 % v období 1990-2020 je mimo jiné způsoben i zvýšenou urbanizací původně přirozeného prostředí, ve kterém se tyto živočichové běžně nacházeli [19]. Dalším ekologickým benefitem by mohlo být využití srážkové vody, která by nemusela být sváděna do dešťové kanalizace. Tato voda by mohla být využívána k závlaze

## 1 Úvod

takovýchto systémů fasád a nebyla by bez většího užitku transportována kanalizačním a říčním systémem pryč z oblasti. Dalšími výhodami z hlediska životního prostředí je schopnost rostlin filtrovat ze vzduchu škodliviny. A jak bylo naznačeno výše, samotná pohltivost vertikálních zahrad by mohla snížit hluk od dopravy a dalších zdrojů. [13]

Práce [14] se pokusila zhodnotit jednotlivé typy zelených fasád z hlediska ekonomické udržitelnosti. Byla snaha kvantifikovat reálné náklady z hlediska celého životního cyklu zelených fasád (instalace, provoz a následná demontáž fasády), které byly porovnávány s benefity pro investora (snížení energetických nároků budovy, navýšení ceny objektu způsobené atraktivitou budovy, podpora výstavby zelených staveb ze strany státu) a společnost (benefity zmiňované v předchozích odstavcích). Je třeba nechat na čtenáři, jak přesný může být například přepočítání zvýšení biodiverzity v okolí budovy na reálnou peněžní hodnotu. Nicméně vertikální zahrada vyšla i při nejpřívětivější predikci, při životnosti 50 let, jako finančně neudržitelná. Pro porovnání, návratnost extenzivní zelené fasády s podpůrným systémem byla při stejných podmínkách 16 let.

Dalších potenciálně benefitních vlastností by se dalo najít ještě mnoho. Jen namátkou by se dal uvažovat vliv vegetace na psychickou pohodu obyvatel města nebo třeba očividný, subjektivní a v zásadě nekvantifikovatelný parametr estetiky vertikální zahrady.

## 1.2 Cíle práce

Tato práce bude zpracovávat data, která byla získána z experimentálních vzorků halových fasád, postavených na UCEEB ČVUT. První cíl je analyzovat vodní bilanci instalované vertikální zahrady. Tato data by měla určit denní potřebu závlahy. Následně bude vytvořen model, který bude tuto potřebu predikovat z minimálního množství vstupních dat, získaných z běžné předpovědi počasí. Přínosem takového řízení závlahy by byla eliminace sensorů vlhkosti substrátu.

Druhým cílem diplomové práce je porovnání jednotlivých variant halových fasád zejména z hlediska prostupu tepla. Bude proveden rozbor naměřených dat se snahou kvantifikovat benefity jednotlivých typů fasád pro vnitřní prostředí budovy. Taktéž budou analyzována případná další zajímavá data, která byla v průběhu prvních 8 měsíců měření zaznamenána.

Třetí část se pokusí prozkoumat možnost zjednodušení existujících dynamických simulačních modelů halových fasád, které byly vytvořeny za účelem studia jejich tepelně vlhkostního chování. Cílem této snahy je nahradit komplexní fyzikální model přenosu tepla a vlhkosti ve vrstvě zeleně, substrátu a větrané dutině statistickým modelem založeným na měřených údajích. Náhradní model větrané dutiny by mohl být posléze propojen se simulací celé budovy, přičemž by bylo eliminováno iterativní (a tedy pomalé) řešení proudění vzduchu ve větrané dutině.

## 2 Experimentální fasáda

Experimentální fasáda byla postavena v létě 2019 na Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB ČVUT) ve spolupráci s firmou LIKOS a Mendelovou univerzitou v Brně. UCEEB se nachází přibližně 10 kilometrů na severozápad od Prahy, v obci Buštěhrad. Jednotlivé vzorky halových fasád jsou vestavěné do dvou testovacích otvorů. Fasáda, kde jsou tyto testovací otvory umístěny, je natočena na západ-jihozápad (pro výpočty byl uvažován 65° odklon od jihu).

Testovací otvory mají rozměry 3 x 3,2 m. Do každého byly vloženy dva vzorky halových fasád (viz obrázek 1). Dvě varianty jsou z vnější strany řešeny plechovým opláštěním. První, s označením S1, je v přímém kontaktu s vnitřní stěnou. Druhá, označená jako S2, má mezi trapézovým plechem a vnitřní stěnou provětrávanou dutinu o tloušťce 6 cm.



Obrázek 1 – Experimentální vzorky halové fasády v testovacích otvorech

Další dvě varianty fasády jsou osazeny vertikální zahradou. Ta je od vnitřní stěny taktéž oddělena provětrávanou dutinou o tloušťce 6 cm. Tyto varianty jsou nazvané S3a a S3b a jsou z hlediska skladby identické. Vertikální zahrada je modulární, je složena z odnímatelných košů (2 x 9 ks na každé variantě) se substrátem a vegetací (viz obrázek 2). Každý koš má velikost 60 x 30 x 10-13 cm. Tyto koše jsou složeny z obalu z kokosových vláken, ve kterém je zadržován substrát, a drátěné sítě, která je přichycena na horizontální hliníkové omega profily. Nad každou řadou košů je umístěn vývod ze zavlažovacího

## 2 Experimentální fasáda

systemu, který po šířce distribuuje vodu do košů (viz obrázek 3). Vertikální zahrada je od provětrávané mezery oddělena parotěsnou fólií.

Všechny fasádní varianty mají totožnou vnitřní stěnu, složenou z vnější paropropustné fólie, minerální vlny, ve které je kovový nosný skelet (obrázek 4), polyethylenové fólie, nevětrané dutiny a sádkartonového záklopu. Pro řez jednotlivými typy fasád viz obrázky 5, 6 a 7.



Obrázek 2 – Modulový koš vertikální zahrady



Obrázek 3 – Zavlažovací systém



Obrázek 4 – Nosný skelet před zakrytím tepelnou izolací



## 2.1 Tepelně vlhkostní parametry testovaných fasád

Skladba vnitřní stěny a vlastnosti materiálů viz tabulka 1:

vrstva materiálu (od interiéru)	$d$	$\lambda$	$\rho$	$Sd$	$R$
	[m]	[W/(m*K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m]	[m <sup>2</sup> *K/W]
Sádkartonový záklop	0,01	0,22	750,00	0,10	0,05
Nevětraná vzduchová vrstva	0,05	0,50	-	-	0,10
PE fólie	-	-	-	36,00	-
Minerální vlna	0,08	0,06	40,00	0,16	1,33
Minerální vlna + ocelový skelet	0,08	0,08*	40,00	0,16	1,00
Paropropustná fólie	-	-	-	0,02	-
CELKEM	0,22	-	-	36,44	2,48

\* do hodnoty jsou započítány tepelné mosty od ocelového skeletu dle ČSN EN ISO 6946

Tabulka 1 – Parametry vnitřní stěny

Taktěž pro jednotlivá exteriérová řešení fasád byly definovány vlastnosti materiálů a vypočteny tepelně-vlhkostní parametry, viz tabulka 2:

vrstva materiálu (od interiéru)	$d$	$\lambda$	$\rho$	$Sd$	$R$
	[m]	[W/(m*K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m]	[m <sup>2</sup> *K/W]
<b>S1</b>					
Trapézový plech	0,01	50,00	7850,00	8,60	0,0001
CELKEM	0,01	-	-	8,60	0,0001
<b>S2</b>					
Provětrávaná vzduchová dutina	0,06	0,30*	1,20	0,01	0,20
Trapézový plech	0,005	50,00	7850,00	8,60	0,00
CELKEM	0,065	-	-	8,61	0,20
<b>S3</b>					
Provětrávaná vzduchová dutina	0,06	0,30*	1,20	0,01	0,20
Parotěsná fólie	0,002	0,20	1400,00	280,00	0,01
Substrát	0,10	1,20	850,00	1,70	0,08
CELKEM	0,162	-	-	281,71	0,28

\* přibližná hodnota podle ČSN EN ISO 6946

Tabulka 2 – Parametry jednotlivých exteriérových řešení halových fasád

## 2 Experimentální fasáda

Výsledné parametry každého testovaného vzorku viz tabulka 3:

Název testovaného pole	$d$	$S_d$	$R$	$U$
	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> *K/W]	[W/m <sup>2</sup> *K]
S1	0,225	45,04	2,65**	0,38
S2	0,285	36,44*	2,93**	0,34
S3	0,382	36,44*	3,02**	0,33

\* Hodnoty jsou při uvažování  $S_d$  od větrané dutiny k interiéru

\*\*Hodnoty obsahují součet odporů při přestupu tepla mezi konstrukcí a vzduchem dle ČSN 73-0540

**Tabulka 3** –Parametry jednotlivých testovaných variant halových fasád

## 2.2 Senzory a jejich umístění v testovaných fasádách

Chování fasád bylo měřeno několika různými typy senzorů:

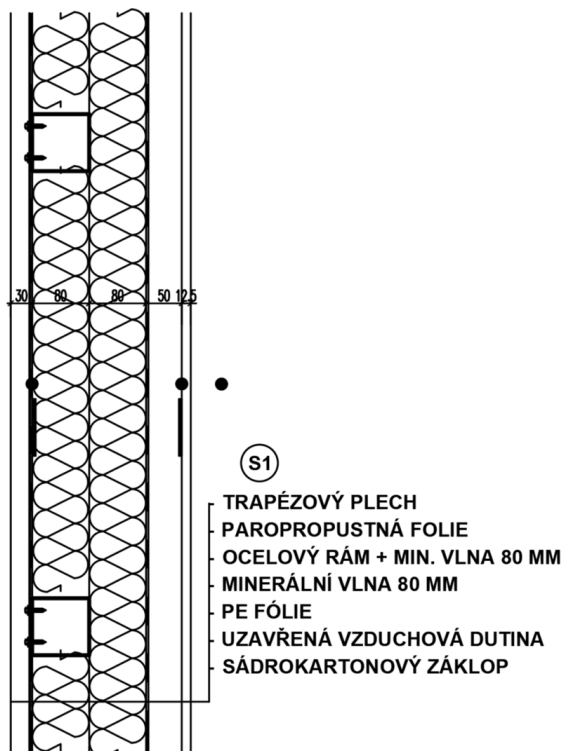
- 1) teplotní senzory Sensit TG3 (Pt1000) s přesností  $\pm 0.15 + 0.002 \times |T|$  K
- 2) teplotní a vlhkostní (RH) senzory Rotronic HygroClip HC2-C04 s přesností  $\pm 0.3$  °C a  $< 0,1$  % RH při 23 °C
- 3) teplotu a obsah vlhkosti měřící senzory Campbell CS650 s přesností  $\pm 0.1$  °C a  $< \pm 3$  % obsahu vlhkosti (přesnost měření je závislá na typu půdy, kalibrační testy před umístěním do fasády nebyly provedeny)
- 4) bezkontaktní teplotní senzory Apogee SI 421, infračervené radiometry s rozsahem pokrytí 36°
- 5) pyranometry Kipp Zonen s přesností  $\pm 5$  % od měřené hodnoty
- 6) senzory Hukseflux HFPO1 měřící hustotu tepelného toku.

Vnitřní teploty a hodnoty relativní vlhkosti jsou měřeny senzory HygroClip HC2-S přesností  $\pm 0.1$  °C a  $\pm 0.8$  % RH.

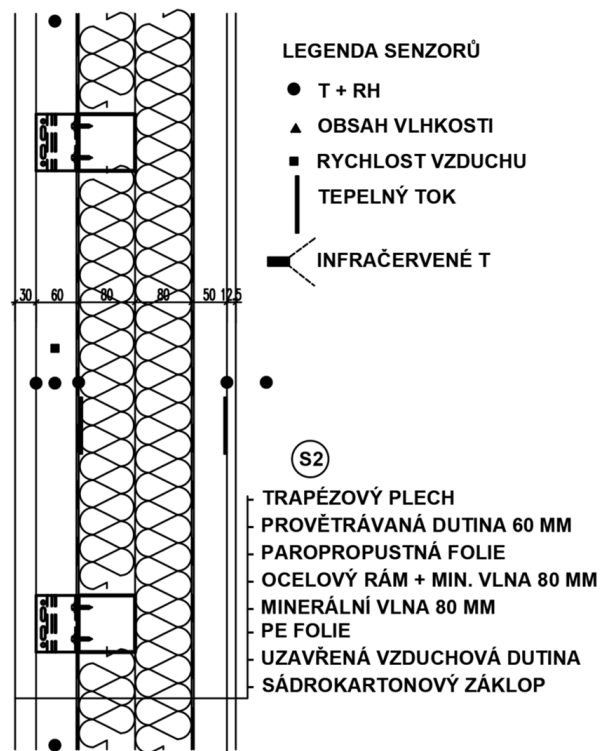


## 2 Experimentální fasáda

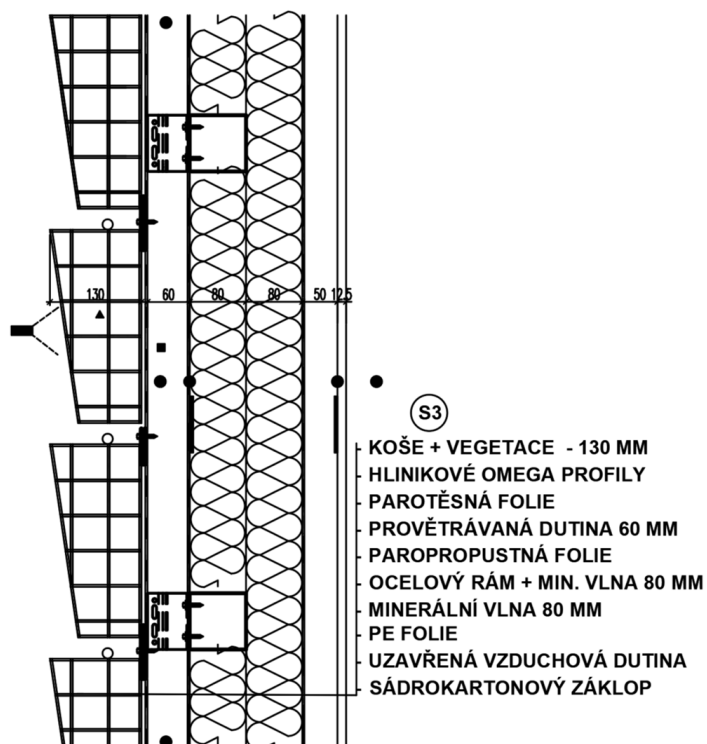
Umístění senzorů v jednotlivých fasádách viz řezy konstrukcí na obrázcích 5, 6 a 7:



Obrázek 5 – fasáda S1



Obrázek 6 – fasáda S2



Obrázek 7 – fasáda S3a/S3b

## 3 Vodní bilance vertikální zahrady

### 3.1 Úvod

Všeobecná potřeba snižovat nadměrnou spotřebu vody nutí projekční a výzkumné týmy optimalizovat množství využívané, převážně pitné vody získávané z omezených vodních zdrojů. Jako taková je analyzovaná vertikální zahrada na tomto zdroji maximálně závislá, jelikož samotný déšť nemůže pokrýt potřebu závlahy zeleně umístěné na svislé fasádě.

Proto zpravidla bývají tyto fasády osazené systémy umělé závlahy, které poskytují dostatečný přísun vody a minerálů, jež fasáda využívá pro fotosyntézu či fotorespiraci. Při tomto jevu je určité množství vody transpirací vypouštěno zpět do prostoru. Taktéž samotné vysychání substrátu, tedy evaporace, je během dne nezanedbatelné. Celkový odpar fasády je tedy nazván evapotranspirací.

Problematické nicméně bývá nastavení závlahy tak, aby rostliny prosperovaly, tedy vykonávaly svou funkci, ať už estetickou, či ochlazující, a zároveň nespotřebovaly přílišné množství vody.

Prvním nevhodným extrémem je závlaha nedostatečná, kdy rostlina sesychá z nedostatku vody. Druhý problém naopak nastává, když do fasády pravidelně přitéká příliš velké množství závlahy, což naopak způsobuje uhnívání rostlin. Tak jako tak, odstranění následků bývá pracné a často i drahé, taktéž přebytečná voda povětšinou odtéká zpět do kanalizace, aniž by poskytla jakýkoli benefit.

Prvním cílem této kapitoly tedy je zanalyzovat současný stav závlahy na experimentální fasádě, fungující na měření hmotnostního obsahu vody v substrátu.

Následným krokem je za pomoci zjištěných okrajových podmínek vytvořit prediktivní algoritmus závlahy, který nebude zavlažovat na základě měřených hodnot vlhkosti substrátu.

Tento model by nicméně nebyl v praxi využitelný. Není pravděpodobné, že by byla každá nově instalovaná fasáda monitorována tak, jako fasáda na UCEEB. Výsledkem této kapitoly tedy má být prediktivní model závlahy upravený takovým způsobem, aby denní dávku vody odhadl z dostupných údajů v běžné denní předpovědi počasí.

## 3.2 Výpočet evapotranspirace

Pro vyhodnocení evapotranspirace instalovaných rostlin a substrátu byla vytvořena rovnice vodní bilance vertikální zahrady:

$$\frac{\Delta m_w}{\Delta t} = g_{in} - g_{out} + g_r - g_{et} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{hod})] \quad (1)$$

V této rovnici je rozdíl hmotnosti vody v substrátu v čase  $\Delta m_w/\Delta t$  ovlivněn přiváděnou vodou pro závlahu  $g_{in}$ , odtokem přebytečné vody ze závlahy a deště  $g_{out}$ , srážkovou vodou  $g_r$  a evapotranspirací rostlin a substrátu  $g_{et}$ .

Pro lepší pochopení problému je vhodné popsat jednotlivé proměnné v rovnici detailněji. Způsob získání těchto dat, jejich závislost na ostatních proměnných nebo změnu v době měření experimentu jsou zásadní pro pochopení dále rozebíraného algoritmu závlahy.

-  $\Delta m_w/\Delta t$  je úbytek (záporné hodnoty) resp. přírůstek (kladné hodnoty) vlhkosti v substrátu. Veličina je vypočtena z průměru hodnot 4 senzorů měřících měrnou vlhkost na různých místech jednotlivých polí vertikální zahrady.

-  $g_{in}$  je přítok vody do systému závlahy, reagující na aktuální vlhkost substrátu. Systém závlahy se spouští v okamžiku, kdy senzory měrné vlhkosti uvnitř košů se substrátem naměří hodnotu pod  $0,3 \text{ m}^3$  vody na  $1 \text{ m}^3$  substrátu (viz graf 2). Obě dvě oddělená pole fasády (S3a i S3b) byla v roce 2019 zavlažována dle stejného algoritmu.

-  $g_{out}$  je odtok vody z fasády. Je závislý na přítoku od závlahy a případných ziscích od deště. Cílem závlahy je, aby byl odtok nulový, tedy že všechna voda bude spotřebována evapotranspirací. To se začalo dařit až v průběhu července, kdy byla upravena hodnota měrné vlhkosti na výše zmíněných  $0,3 \text{ m}^3$  závlahy na kubický metr substrátu.

-  $g_r$  je větrem hnaný déšť na rovinu fasády, který se odhaduje z úhrnů srážek na horizontální rovinu. Pro výpočtové modely bylo uvažováno, že na rovinu fasády dopadá 50 procent měřeného objemu vody dopadajícího na rovinu horizontální. Tato hodnota je zasažena poměrně velkou mírou chyby, jelikož se jen velmi těžce vyhodnocuje, kolik vody reálně dopadá při dešti do plochy vertikální zahrady. Tato chyba se poté odráží na určitých dnech, kdy při dešti získává fasáda dle rovnice velké množství vody, které reálně bylo pravděpodobně nižší. Naopak při přívalovém dešti, který bude hnán západním větrem, by množství dopadající vody na fasádu mohlo být klidně vyšší.

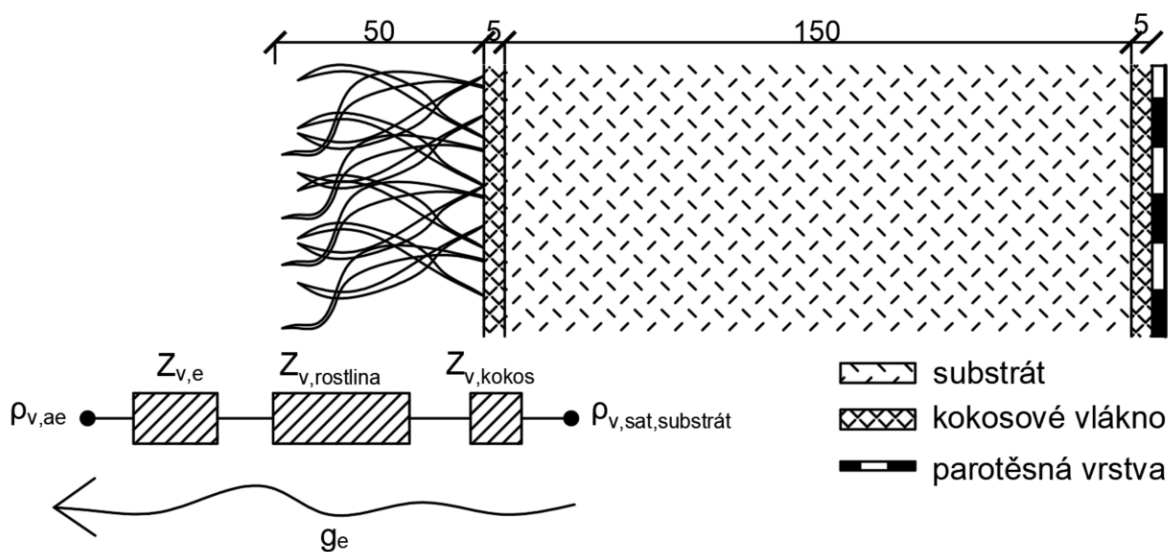
### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

-  $g_{et}$  je evapotranspirace, která se skládá ze dvou částí, evaporace a transpirace:

$$g_{et} = g_e + g_t \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})] \quad (2)$$

kde  $g_e$  je vlhkostní tok evaporací a  $g_t$  vlhkostní tok transpiraci.

K evaporaci dochází přesunem vlhkosti z povrchu substrátu přes obal substrátu, vrstvu rostlin a mezní vrstvu nad rostlinami ven do exteriéru, viz obrázek 8:



Obrázek 8 – Přenos vlhkosti evaporací, řez košem vertikální zahrady

Hodnota relativní vlhkosti v substrátu byla uvažována 100 %, výsledný vlhkostní tok se vypočítá jako (3):

$$g_e = \frac{1}{\sum Z} (\rho_{v,sat,sub} - \rho_{v,ae}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})] \quad (3)$$

kde  $\sum Z$  je součtem difuzních odporů kokosového vlákna, vrstvy rostlin a odporu při přestupu vodní páry z povrchu rostlin do okolního vzduchu.

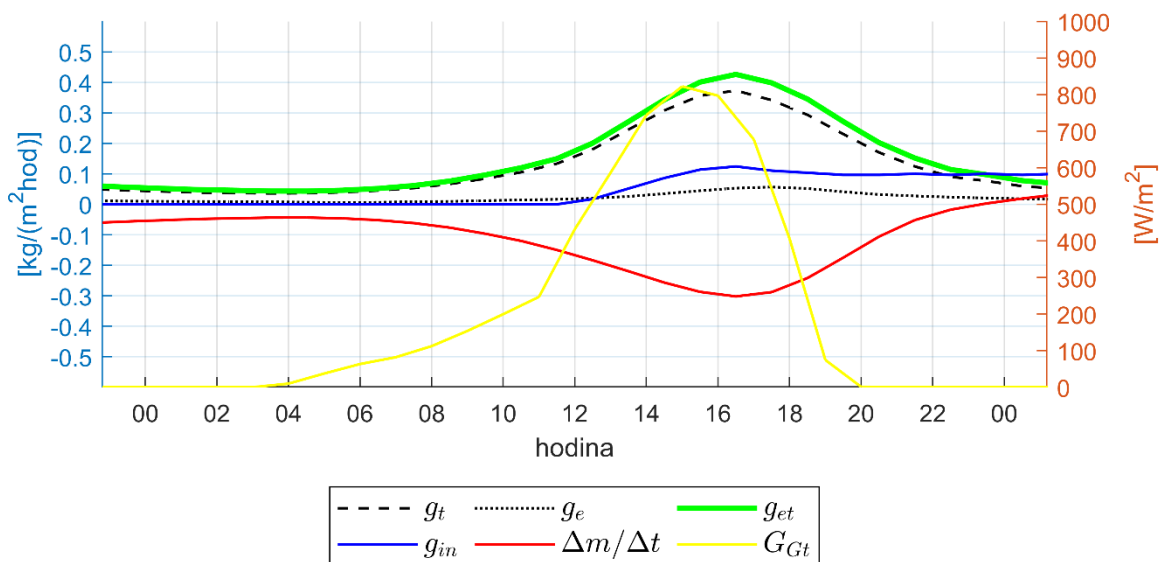
Transpirace je odpar vody, který rostlina v průběhu fotosyntézy či fotorespirace uvolňuje do okolí. Tato hodnota není v současném stavu experimentu měřitelná, nicméně díky úpravě vzorce (1) a (2) se dá od ostatních měřených proměnných vytknout a dopočítat.

$$g_t = g_{in} - g_{out} + g_r - \frac{\Delta m_w}{\Delta t} - g_e \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})] \quad (4)$$

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

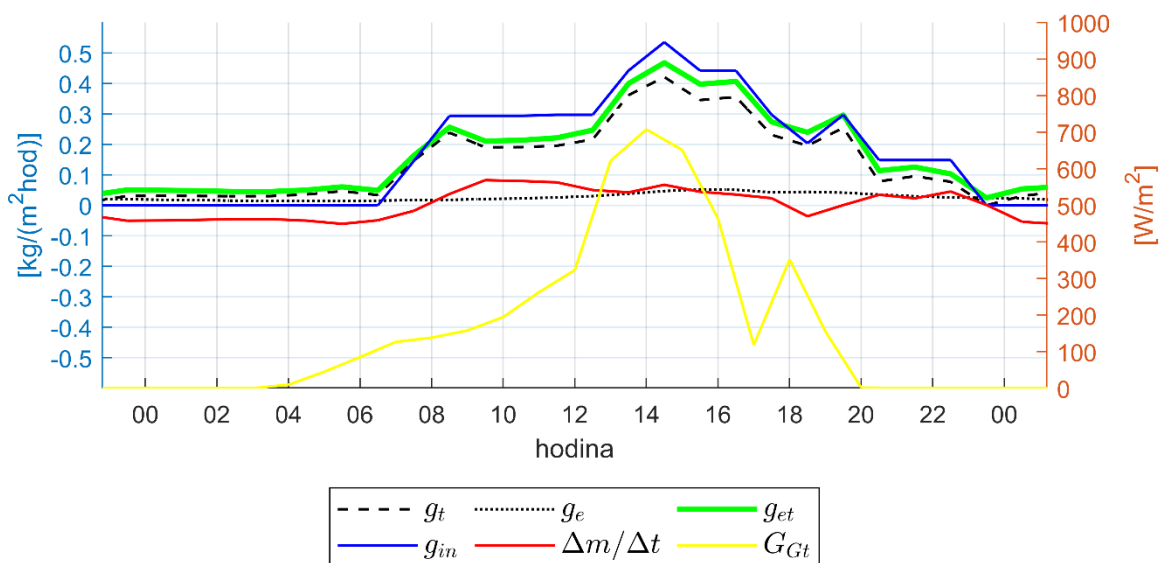
Pro lepší pochopení chování fasády byl zvolen hodinový krok výpočtu, při kterém je vidět vliv ozáření a teploty na výslednou evapotranspiraci vertikální zahrady.

Jako demonstrace schopnosti rostlin a substrátu evapotranspirovat poslouží 2 grafy. Na prvním (graf 1) z blíže neznámého důvodu nezafungoval systém závlahy. Nicméně právě díky této chybě je zde dobře vidět denní režim fasády při téměř nulovém vnějším zásahu.



Graf 1 – Den s minimální závlahou (10.7.2019)

Na grafu 2 je naopak vidět, jak v ideálním případě závlaha fungovat má. Hodnoty  $\Delta m_w/\Delta t$  (červené křivky) se pohybují okolo nuly. Závlaha tedy kompenzuje ztrátu vlhkosti v substrátu. Je zřetelné, že evapotranspirace je dle modelu velmi závislá právě na závlaze.



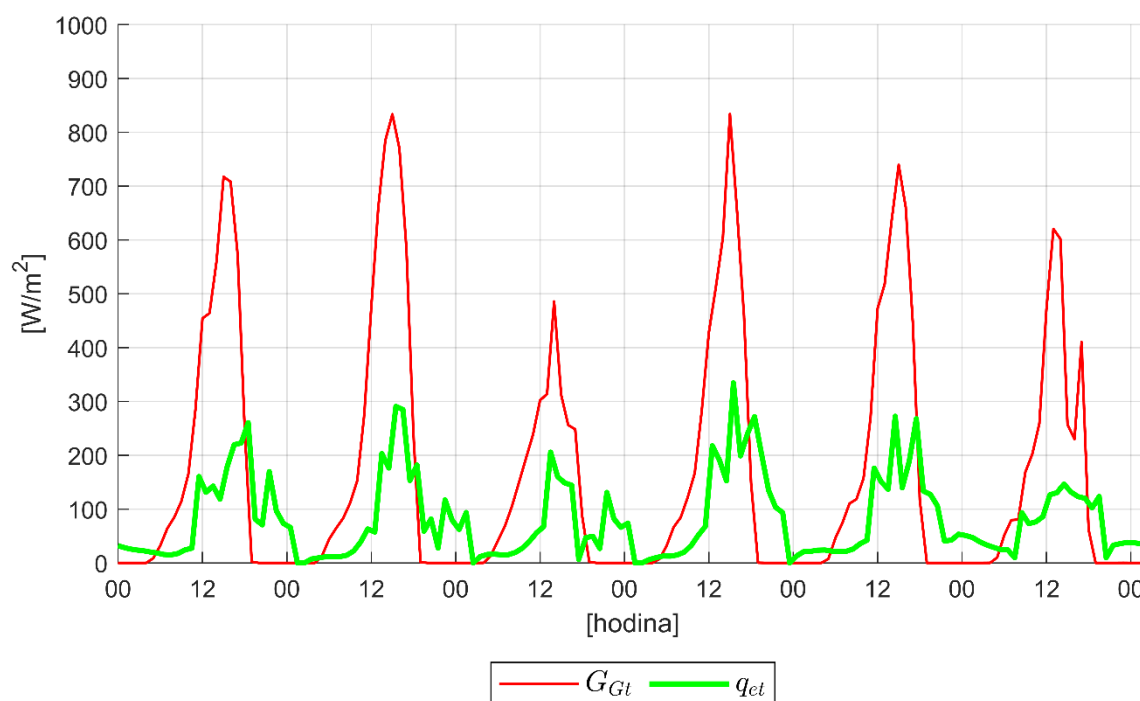
Graf 2 – Den s optimální závlahou (6.7.2019)

### 3.2.1 Chladící schopnost fasády

Znalost velikosti evapotranspirace umožňuje kvantifikovat schopnost zelené fasády ochlazovat svůj vlastní povrch. Nejedná se však o schopnost předávat chlad svému okolí, jako spíše o schopnost fasády přeměnit některé solární zisky na vodní páru a tím ochladit sebe samotnou.

Chladící výkon se dopočítá vynásobením vlhkostního toku evapotranspirací latentním teplem přeměny z vody na páru, které bylo uvažováno konstantní hodnotou  $2,5 \cdot 10^6$  J/kg vody.

Graf 3 zobrazuje chladící výkon vertikální zahrady a globální solární ozáření roviny fasády.



Graf 3 – Chladící výkon vertikální zahrady (22.-27.8.2019)

Je zřejmé, že evapotranspirace kompenzovala přibližně třetinu dopadajícího solárního záření na rovinu fasády. Na průběhu tepelného toku evapotranspirací  $q_{et}$  lze vysledovat, kdy byla fasáda zalita (typicky odpoledne). Kdyby byla fasáda zavlažována více anebo v jiný čas, mohl by být chladící efekt vyšší.

### 3.3 Model odhadu evapotranspirace

Za předpokladu dostatečné zálivky závisí evapotranspirace na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu a solárním záření na rovinu fasády. Tyto vztahy jsou základem matematického modelu, který by měl odhadnout denní množství vody, které je třeba do fasády dodat.

#### 3.3.1 Metoda násobné lineární regrese

Pro analýzu souvztažností mezi proměnnými byla využita vícenásobná lineární regrese:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon \quad (5)$$

kde  $y$  je závislá proměnná, v tomto případě evapotranspirace [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{den})$ ]. Hodnoty  $x$  jsou známé veličiny, které jsou v nějakém vztahu s výslednou evapotranspirací. Byla zvolena průměrná denní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ] a denní dávka ozáření [ $\text{Wh}/(\text{m}^2\text{den})$ ].

Použitá rovnice vypadá následovně:

$$g_{et} = b_0 + b_1H_{Gt} + b_2T_{ae} \quad [\text{kg}/\text{m}^2\text{den}] \quad (6)$$

Kde parametr  $b_0$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{den})$ ] udává počáteční hodnotu při nulových hodnotách nezávislých neznámých, hodnota  $b_1$  [ $\text{kg}/\text{Wh}$ ] definuje závislost na ozáření a  $b_2$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{K})$ ] zase teplotní závislost. Z hlediska grafického zobrazení mají hledané konstanty  $b_1$  a  $b_2$  určit sklony roviny,  $b_0$  je průsečík roviny s osou  $z$  (viz zobrazená rovina na grafech 7 a 8).

Taktéž byl vytvořen druhý regresní model, který místo teploty venkovního vzduchu uvažuje koncentraci vodní páry [ $\text{kg}/(\text{m}^3\text{den})$ ] v blízkosti povrchu fasády, která je závislá na teplotě ( $\rho_{v,sat} = f(T_{ae})$ ). Hodnota koncentrace vodní páry na hraně vegetace byla uvažována jako plně nasycená.

Použitý vzorec pro výpočet koncentrace vodní páry:

$$\rho_{v,sat} = \frac{a(b \frac{T}{100})^n}{R_v(T + 273,15)} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (7)$$

Kde koeficienty  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (288,68 Pa; 1,098; 8,02) vyznačují konstanty pro výpočet koncentrace při nadnulových teplotách a  $R_v$  plynovou konstantu pro vodní páru o hodnotě 461,5 J/( $\text{kg} \cdot \text{K}$ ). [20]

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Následná rovnice vícenásobné lineární regrese vypadá takto:

$$g_{et,den} = b_0 + b_1 H_{Gt} + b_2 \rho_{v,sat} \quad [\text{kg/m}^2\text{den}] \quad (8)$$

kde parametr  $b_2$  [m] definuje závislost evapotranspirace na koncentraci nasycené vodní páry u fasády.

#### 3.3.2 Datové soubory

V současném stavu experimentu bylo možno pracovat se dvěma základními soubory dat, a to s hodnotami evapotranspirace ze dvou oddělených, stejně orientovaných a stejným způsobem zavlažovaných polí vertikální zahrady S3a a S3b.

Základním časovým vymezením je období od 1. srpna do 28. října. Datum prvního srpna bylo zvoleno z důvodu změny požadované vlhkosti substrátu ke konci července, kdy byl v zásadě eliminován odtok vody z fasády. 28. říjen je poslední den, kdy byla fasáda zavlažena. Zároveň je třeba přiznat, že ne všechny dny byly měřeny, díky výpadkům bylo celkové množství uvažovaných dní na každém poli fasády 77.

Po prvotních regresích bylo variantou soubor dat upravit a odstranit ty hodnoty, u kterých bylo možno po bližším zkoumání prohlásit, že jsou buďto ovlivněny atypickými okrajovými podmínkami, či nereálnými vypočtenými hodnotami evapotranspirace. Jedná se o 5 odstranitelných časových úseků.

První dva jsou typické extrémními okrajovými podmínkami pro obě pole fasády:

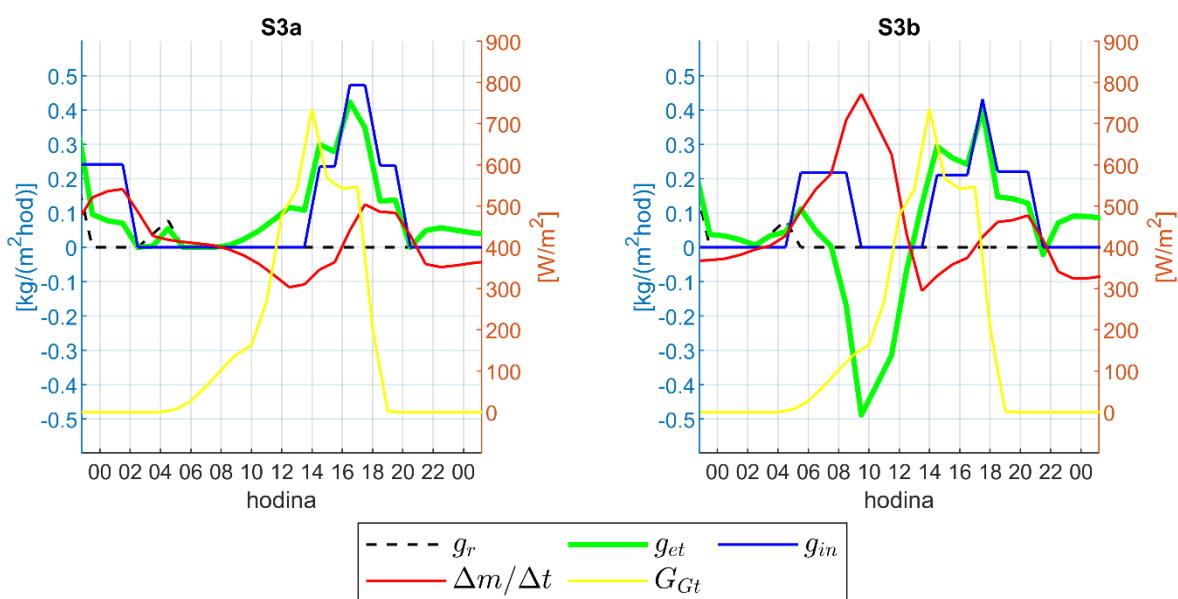
- 1) 4. – 5. srpen, kdy došlo k velkému „přelití“ fasády přívalovým deštěm, který mnohonásobně zvýšil vlhkost substrátu. Následující den byl naopak co se týče evapotranspirace vysoce nadprůměrný, kdy fasády zpracovávaly přebytek z předchozího deště.
- 2) 15. – 17. srpen, kdy 15. došlo k testování umělé závlahy. Během přibližně patnáctiminutového testu bylo do fasády přivedeno mnohonásobně vyšší množství vody, než je běžné. V ten den dochází dle bilanční rovnice v poli S3a k záporné evapotranspiraci, což se nezdá reálné. Poté dochází k obdobnému scénáři jako v prvním případě, kdy jsou následující dva dny z hlediska evapotranspirace nadprůměrně, i když tomu okrajové podmínky neodpovídají.



### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Další 3 potenciálně odstranitelné úseky byly definované zápornou evapotranspirací v poli S3b. Z principu by evapotranspirace neměla vycházet záporně, chyba pravděpodobně vzniká díky zvolenému výpočetnímu modelu. Jedná se o tyto dny:

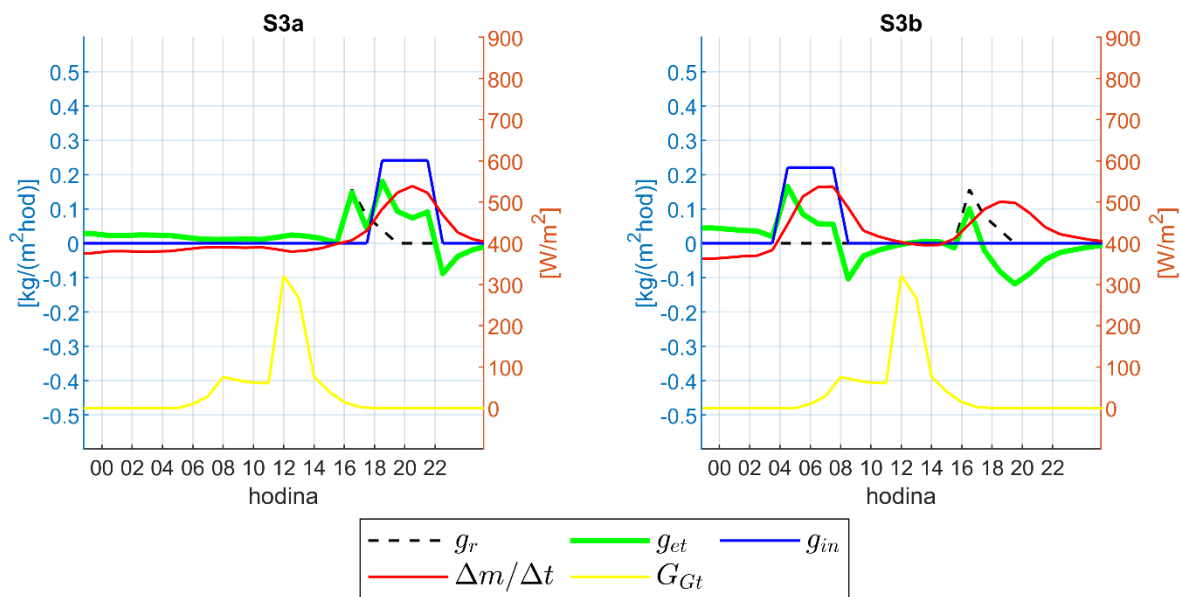
3) 21. srpna, kdy pole S3b zaznamenalo nevysvětlitelný vzestup  $\Delta m_w/\Delta t$ . Ač došlo okolo čtvrté hodiny ranní k drobnému dešti, pole S3b začalo zavlažovat. Nicméně s přihlédnutím k dalším sledováním na ostatních zkoumaných dnech, ani kombinace deště a závlahy by neměla způsobit takový nárůst vlhkosti v půdě. Druhé pole navíc vzestup od deště v zásadě nezaznamenalo. Viz graf 4, porovnávající tento den v jednotlivých polích:



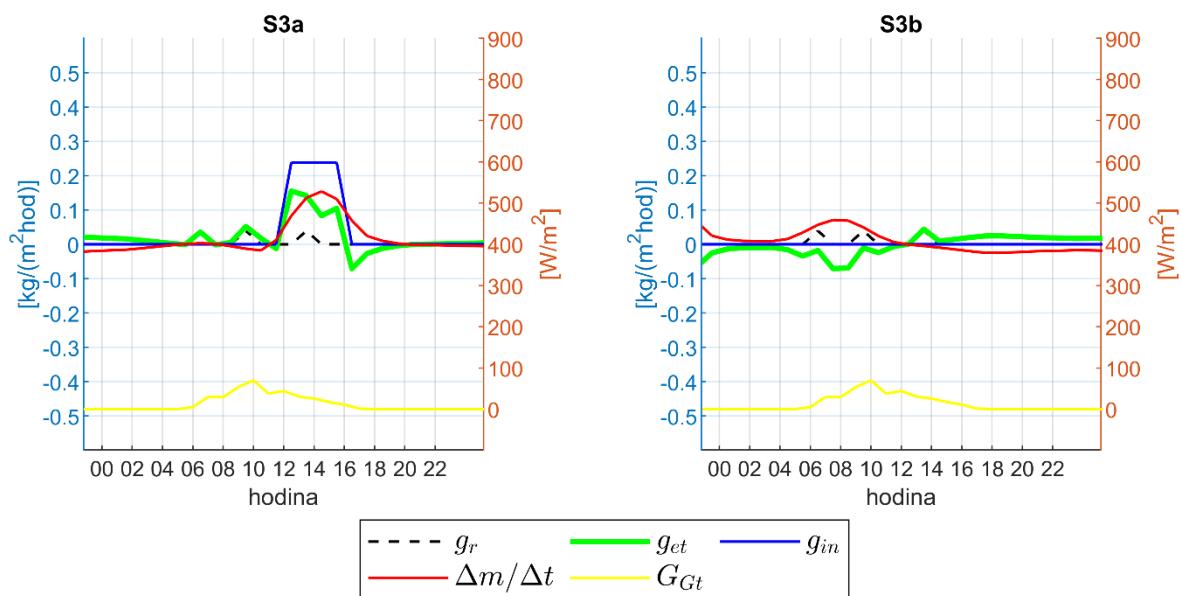
Graf 4 – 21. srpen (S3a vlevo, S3b vpravo)

4) Dva dny, které byly typické nízkou teplotou a minimálním ozářením kolmé roviny fasády. Z toho důvodu je evapotranspirační schopnost fasády nízká a zdá se, že systém závlahy není schopen optimálně vyhodnotit nutnost závlahy. V tyto dny s velmi malou evapotranspirací obecně hrozí větší chyba modelu. Tyto dva dny se zápornou evapotranspirací jsou 3. a 5. září na poli S3b. Viz následující grafy 5 a 6:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 5 – 3. říjen (S3a vlevo, S3b vpravo)



Graf 6 – 5. říjen (S3a vlevo, S3b vpravo)

Datové soubory byly následně rozděleny v čase, a to od 1. srpna do 15. září a od 16. září do 28. října. Vznikly tedy 2 x 2 soubory dat s případnými odstraněnými hodnotami, viz následující tabulka 4:

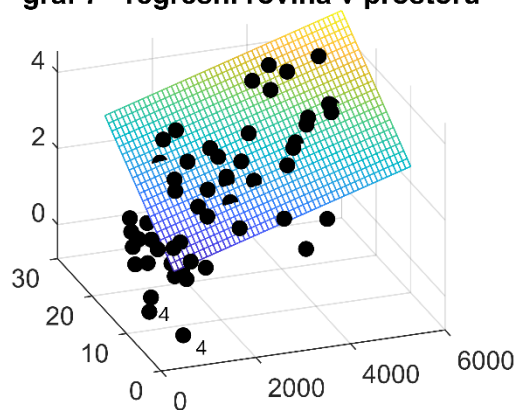
### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

	úplný soubor		upravený soubor 1		upravený soubor 2		upravený soubor 3	
odstraněné úseky	-		1,2		1,2,3		1,2,3,4	
pole	S3a	S3b	S3a	S3b	S3a	S3b	S3a	S3b
1.8. - 15.9.	43	43	38	38	38	37	38	36
16.9. - 28.10	34	34	34	34	34	34	34	33
<b>celkem</b>	<b>77</b>	<b>77</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>71</b>	<b>72</b>	<b>69</b>

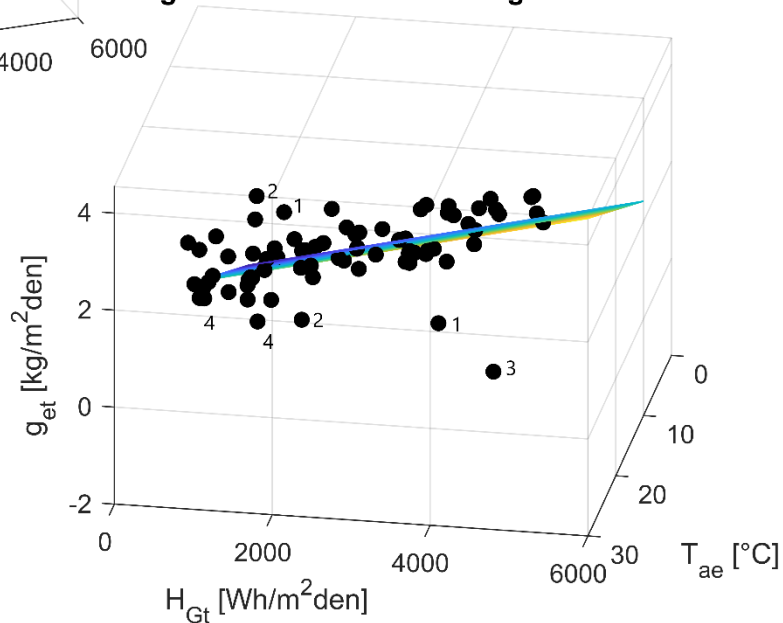
Tabulka 4 – Datové soubory a jejich velikost

Pro lepší představu poslouží grafy 7 a 8, na kterých jsou tyto potenciálně odstranitelná data z pole S3b zobrazená:

graf 7 - regresní rovina v prostoru



graf 8 - natočení kolmo reg. rovině



Graf 7 a 8 – Potenciálně chybná data

### 3.3.3 Výpočetní programy a statistické vyhodnocení

Pro výpočty všech násobných lineárních regresí byly použity dva programy. Primárním byl Matlab 2019. Zároveň byl pro kontrolu využit i Microsoft Excel, který v doplňku analýza dat násobnou lineární regresí nabízí taktéž.

Všechny regresní modely počítají s intervalem spolehlivosti 95 %, tedy že ze sta spočítaných intervalů bude 95 intervalů obsahovat správnou hodnotu. Samotný interval je definován horní a dolní hranicí, která bude taktéž v grafech zobrazena.

Validita samotné regrese je definována koeficientem determinace, jinak také značený jako  $R^2$ . Pohybuje se od hodnoty 0 do 1 (0 až 100 %) a počítá se takto:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad [-] \quad (9)$$

kde zlomek  $SS_{res}/SS_{tot}$  představuje podíl rozdílů chyb (tedy rozdíl mezi predikcí modelu a naměřenou hodnotou). Jednotlivé hodnoty se počítají následovně:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (\hat{x} - x)^2 \quad [-] \quad (10)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \quad [-] \quad (11)$$

kde  $n$  je počet měření,  $\hat{x}$  proměnná zjištěná regresí,  $x$  proměnná zjištěná měřením a  $\bar{x}$  je střední hodnota  $x$ .

Dalšími statistickými nástroji využívanými pro zhodnocení kvality regresních modelů je vážená absolutní chyba (MABE) a vážená absolutní procentuální chyba (MAPE). Tyto hodnoty reprezentují (procentuální) odchylky od měřené hodnoty. Byly počítány následovně:

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x - \hat{x}| \quad [-] \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x - \hat{x}|}{x} \quad [-] \quad (13)$$

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Jejich výhodou oproti relativním chybám je, že v případě oscilace okolo střední hodnoty počítají s odchylkou absolutní, tedy že se plusové a minusové chyby nebudou negovat.

## 3.3.4 Vypočtené hodnoty regresních parametrů

### 3.3.4.1 Regresní metoda 1 – proměnné $H_{Gt}$ , $T_{ae}$

První regresní modely uvažovaly jako druhou nezávislou proměnnou  $T_{ae}$ , tedy průměrnou denní teplotu. Zároveň bylo v této podkapitole pracováno se soubory jednotlivých polí obsahujícími kompletní časové období od začátku srpna do konce října.

První regrese proběhla s úplným, tedy neupraveným, souborem. Výsledné koeficienty  $b$  získaných násobnou regresní analýzou byly následující:

	S3a			S3b		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,264	-0,916	-0,569	-1,380	-0,877	-0,374
$b_1$	0,000274	0,000360	0,000447	0,000247	0,000372	0,000498
$b_2$	0,077	0,102	0,126	0,071	0,106	0,142
$R^2$	<b>80,24 %</b>			<b>67,62 %</b>		

Tabulka 5 – Výsledky regresního modelu ( $H_{Gt}$ ,  $T_{ae}$ ) pro úplný soubor

Nízká hodnota koeficientu determinace indikuje, že v souborech dat jsou pravděpodobně hodnoty, které jsou výrazněji odchýlené od výsledné souvztažné roviny. Proto byl pro další regresi využit upravený soubor 1 (viz tabulka 4 z předchozí kapitoly), ve kterém jsou odstraněny předpokládané extrémní hodnoty.

Výsledné hodnoty viz tabulka 6:

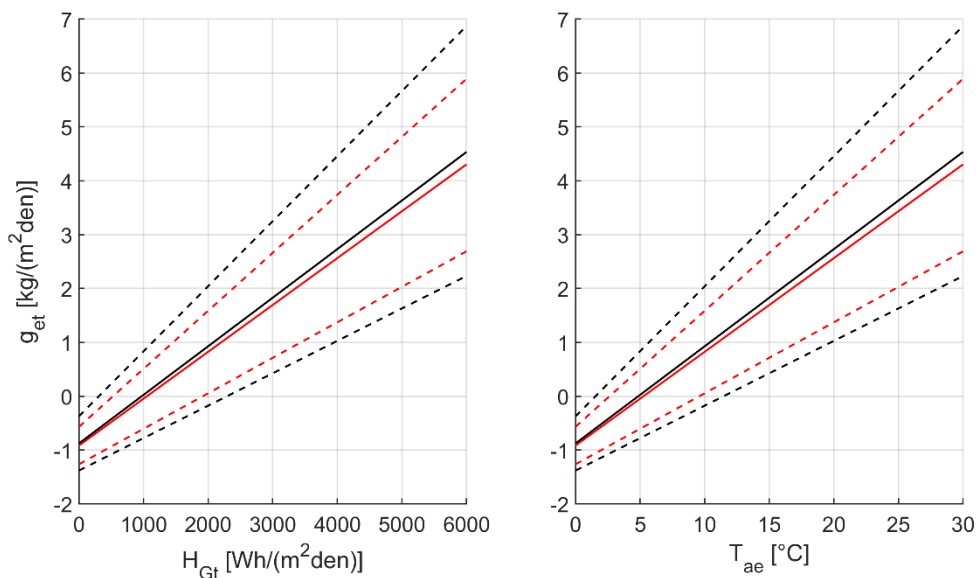
	S3a			S3b		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,109	-0,865	-0,620	-1,290	-0,856	-0,421
$b_1$	0,000328	0,000390	0,000453	0,000308	0,000419	0,000530
$b_2$	0,075	0,092	0,110	0,066	0,097	0,129
$R^2$	<b>89,71 %</b>			<b>75,74 %</b>		

Tabulka 6 – Výsledky regresního modelu ( $H_{Gt}$ ,  $T_{ae}$ ) pro upravený soubor 1

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Tato úprava zvýšila validitu výsledků v obou polích, hlavně v poli S3a se koeficient determinace dostává k hodnotám blízkým 90 procent.

Porovnání vypočtených rovin fasádního pole S3a pro úplný soubor a upravený soubor 1 zde:



Graf 9 – S3a, výsledky lineární regrese, úplný soubor (černě) a upravený soubor 1 (červeně), čárkovaně 95% pravděpodobnost

V poli S3b jsou nicméně stále některé hodnoty, které пониžují  $R^2$ . Byly tedy využity datové soubory 2 a 3, které neuvažují negativní hodnoty evapotranspirace. Výsledky viz tabulka 7:

	S3b – upravený soubor 2			S3b – upravený soubor 3		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,187	-0,870	-0,553	-1,052	-0,750	-0,448
$b_1$	0,000391	0,000473	0,000554	0,000395	0,000471	0,000547
$b_2$	0,070	0,093	0,116	0,065	0,087	0,108
$R^2$	<b>86,62 %</b>			<b>87,49 %</b>		

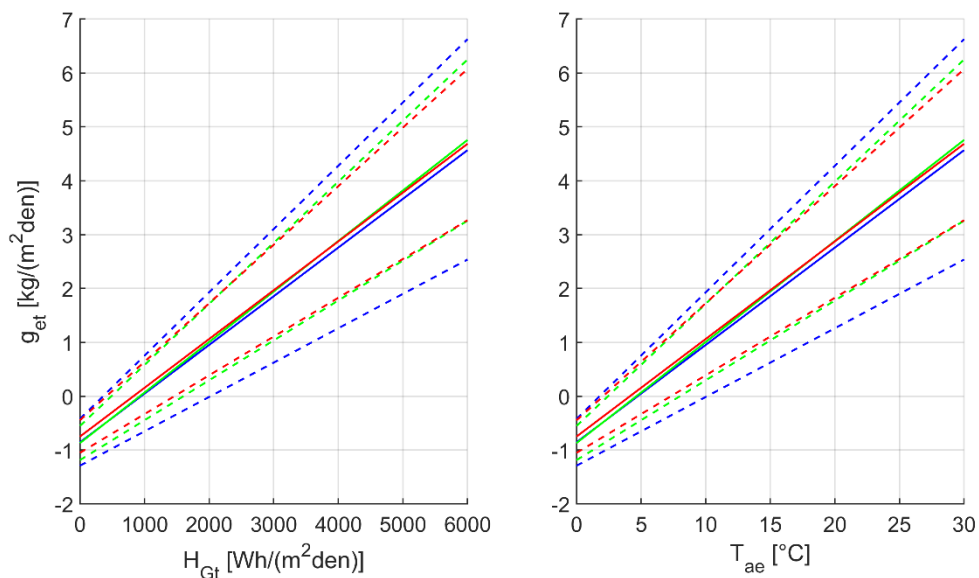
Tabulka 7 – Výsledky regresního modelu ( $H_{Gt}$ ,  $T_{ae}$ ) pro upravené soubory 3 a 4 na poli S3b

Je vidět, že hlavně 21. srpen výrazně ovlivňuje kvalitu regrese. Odstranění této jedné hodnoty výrazně zvyšuje validitu výpočtu (odpovídá to i umístění tohoto bodu v grafu 8, označený číslem 3).

Upravený soubor 3 (soubor bez negativních hodnot v chladnějších dnech) výrazně nezvyšuje kvalitu regrese. Mění se koeficienty  $b$ , nicméně jako takové v zásadě nemění

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

polohu výsledné roviny spočítanou regresí. To samé platí pro roviny 95 % pravděpodobností. Výsledky jednotlivých souborů fasádního pole S3b jsou graficky zobrazeny v grafu 10.



**Graf 10** – S3b, výsledky lineární regrese, upravený soubor 1 (modře), upravený soubor 2 (zeleně) a upravený soubor 3 (červeně), čárkovaně 95% pravděpodobnost

#### 3.3.4.2 Regresní metoda 2 – proměnné $H_{Gt}$ , $\rho_{v,sat}$

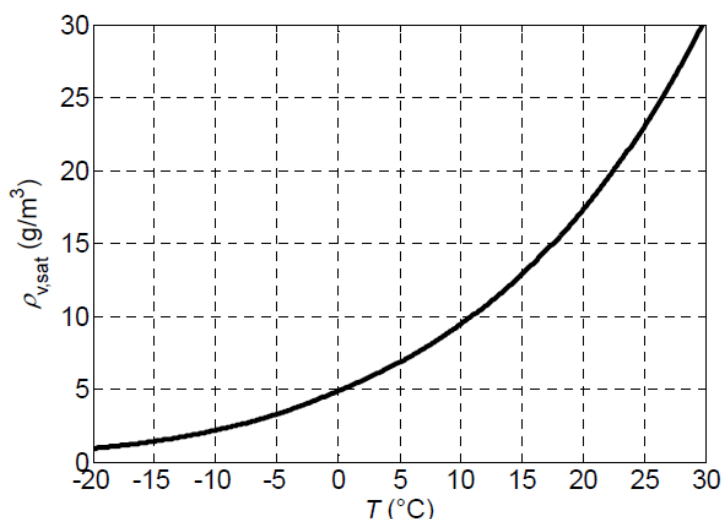
Druhou rovnicí, kterou se tato práce pokusila predikovat evapotranspiraci, byla závislost nikoli na teplotě, ale na koncentraci nasycené vodní páry při dané exteriérové teplotě.

Tato varianta byla zvolena z toho důvodu, že je tato veličina s vlhkostním tokem spojena lépe než samotná teplota. A to proto, že stomata (průduchy) rostliny, přes které dochází k transpiraci, jsou blízka absolutnímu nasycení.

Taktéž graf závislosti nasycené koncentrace vodní páry není lineární, ale exponenciální. Tato skutečnost by mohla lépe popisovat hodnoty evapotranspirace hlavně při vyšších teplotách, kdy jsou hodnoty koncentrace v poměru k nižším teplotám vyšší než u lineárně stoupající teploty.

Pro představu závislosti nasycené koncentrace vodní páry na teplotě je níže přiložen graf 11:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 11 – Závislost nasycené koncentrace vodní páry na teplotě (zdroj [20])

Zároveň bylo rozhodnuto, že pro další výpočty bude uvažován upravený soubor 3, tedy ten, který v poli S3b neuvažuje dvě denní negativní hodnoty evapotranspirace, vzniklé při nízkých teplotách a denním ozáření fasády (viz bod 4 v podkapitole 3.1.4). Jsou to soubory s nejvyšším koeficientem determinace, a i když rozdíl mezi jednotlivými upravenými soubory dat nebyl velký, v dalších statistických parametrech je patrný více. Výsledné hodnoty pro celý úsek (od začátku srpna do konce října) byly následující:

	S3a			S3b		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,182	-0,942	-0,701	-1,082	-0,778	-0,473
$b_1$	0,000323	0,000383	0,000442	0,000382	0,000456	0,000531
$b_2$	0,092	0,111	0,131	0,079	0,103	0,127
$R^2$	<b>90,61 %</b>			<b>87,81 %</b>		
MABE	0,206			0,290		
MAPE	18,32 %			23,74 %		

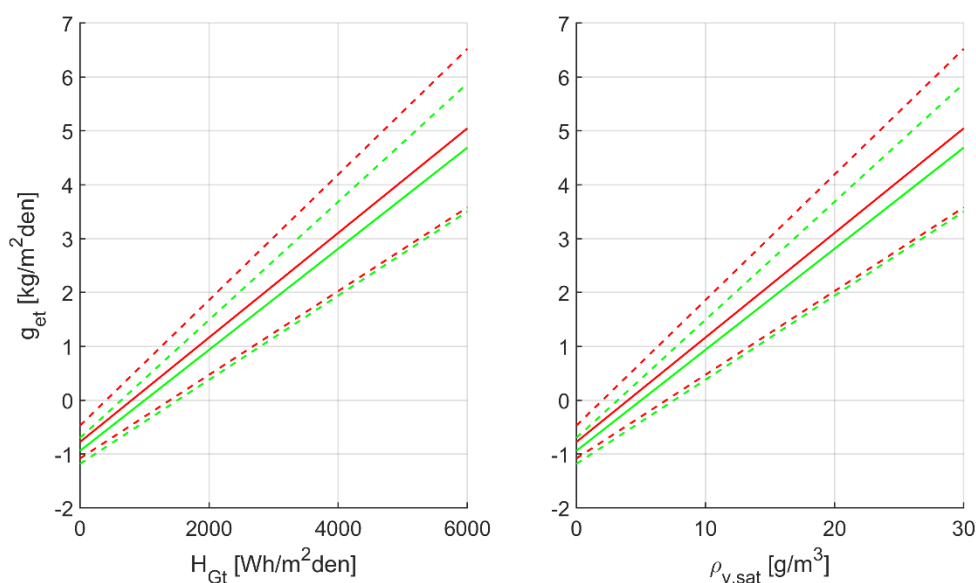
Tabulka 8 – Výsledky regresního modelu ( $H_{Gt}$ ,  $\rho_{v,sat}$ ) pro upravený soubor 1

Při následném srovnání kvality regresí rovnicemi s nezávislými proměnnými  $T_{ae}$  (tabulky 6 a 7) a  $\rho_{v,sat}$  (tabulka 8) je vidět, že regrese pracující s rovnicí (6), tedy s  $\rho_{v,sat}$ , jsou mírně přesnější. Další výpočty tedy budou využívat právě tuto rovnici.



### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Dalším krokem je porovnat jednotlivá pole vůči sobě. Výsledné porovnání obou polí graficky je na grafu 12:



Graf 12 – Výsledky lineární regrese, S3a (zeleně) a S3b (červeně), čárkovaně 95 % pravděpodobnost

Z grafu je vidět, že vztah mezi veličinami existuje a je v obou polích relativně obdobný. Nižší přesnost výsledku (větší rozevření 95 % pravděpodobnosti) u pole S3b odpovídá koeficientu determinace, který je nižší než u pole S3a.

Zároveň byly spočítané další statistické parametry (MABE, MAPE), které ukazují vyšší konzistenci dat ze souboru S3a. Ten vykazuje váženou absolutní chybu 0,206 kg/(m²den) a váženou absolutní procentuální chybu 18,23 % každého měření.

Následně byla regresní metodou zanalyzována jednotlivá pole v čase. Byly tedy uvažovány úseky od 1. srpna do 15. září (úsek 1) a od 16. září do 28. října (úsek 2).

	S3a – úsek 1			S3a – úsek 2		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,503	-0,957	-0,412	-1,075	-0,633	-0,192
$b_1$	0,000316	0,000405	0,000494	0,000260	0,000340	0,000419
$b_2$	0,074	0,109	0,144	0,048	0,089	0,130
$R^2$	<b>86,14 %</b>			<b>80,66 %</b>		
MABE	0,259			0,155		
MAPE	14,17 %			22,12 %		

Tabulka 9 – S3a, výsledky regresního modelu ( $G_{Gt}$ ,  $\rho_{v,sat}$ ) pro časové úseky

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

	S3b – úsek 1			S3b – úsek 2		
	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %	spodní hranice 95 %	vypočtená hodnota	horní hranice 95 %
$b_0$	-1,171	-0,647	-0,124	-0,854	-0,103	0,648
$b_1$	0,000408	0,000495	0,000582	0,000248	0,000375	0,000503
$b_2$	0,058	0,091	0,125	-0,016	0,052	0,119
$R^2$	<b>89,12 %</b>			<b>61,01 %</b>		
MABE	0,260			0,275		
MAPE	13,46 %			28,50 %		

Tabulka 10 – S3b, výsledky regresního modelu ( $H_{Gt}$ ,  $\rho_{v,sai}$ ) pro časové úseky

Z výsledků se dá usuzovat, že letní data z prvních úseků jsou obecně stabilnější. To odpovídá i problémům s nízkými, až negativními hodnotami evapotranspirace, které se objevují v říjnových datech.

Hlavně pole S3b je problematické, zde se koeficient determinace v druhém úseku pohybuje těsně nad 60 %.

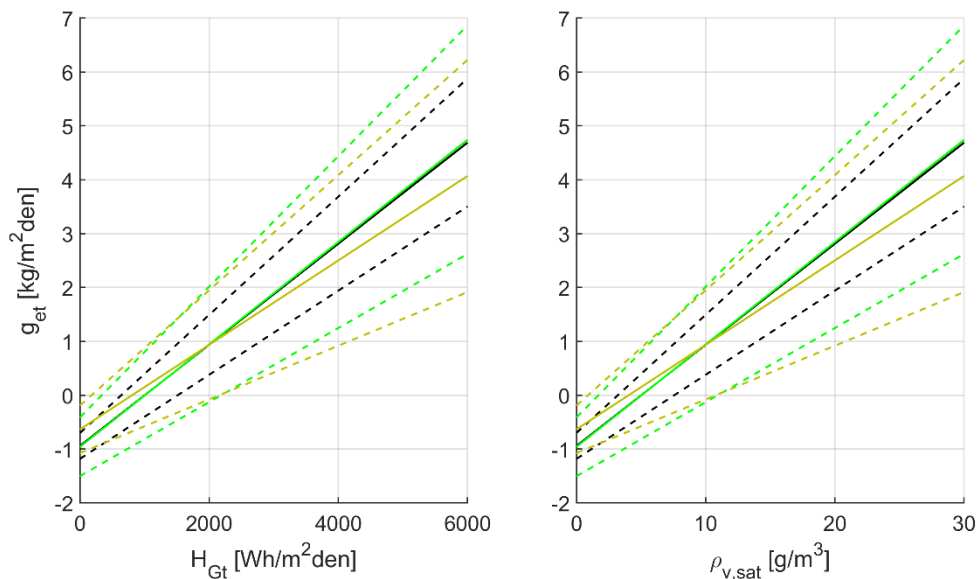
Taktéž bylo analyzováno stejné období na stejném poli v upraveném souboru 2, tedy souboru bez odebraných negativních hodnot. Výsledné  $R^2$  v poli S3b bylo v tom případě 59,7 procenta (MABE 0,291 a MAPE 43,37 %). I když se nejedná o výraznější rozdíly (největší rozdíl je v MAPE, přibližně 15 %), výsledky bez negativních hodnot jsou mírně lepší.

Z toho se dá usoudit, že chybu způsobují právě dny s nízkou hodnotou evapotranspirace. A právě druhé úseky jsou už velmi ovlivněny podzimními okrajovými podmínkami.

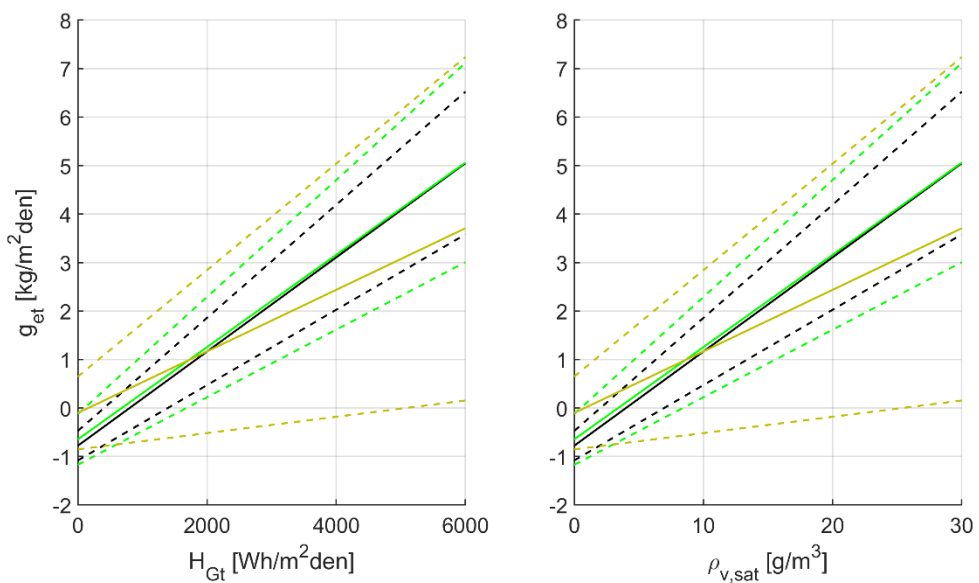
Naopak díky rozdělení souboru na dvě části si v poli S3b dokonce polepšil první úsek oproti úseku celému, jelikož má o přibližně 2,2 procenta vyšší koeficient determinace. Taktéž má nižší MAPE. Z toho se dá usuzovat, že predikce evapotranspirace v důležitých letních měsících je přesnější než na podzim.

Pro lepší představu byly vytvořeny grafy závislostí pro jednotlivá pole. Do těchto grafů byly pro přehlednost přidány i hodnoty regresí z celých souborů. Viz grafy 14 a 15:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 13 – S3a, výsledky lineární regrese, celý soubor (černě), 1. úsek (zeleně) a 2. úsek (hnědě),  
čárkovaně 95% pravděpodobnost



Graf 14 – S3b, výsledky lineární regrese, celý soubor (černě), 1. úsek (zeleně) a 2. úsek (hnědě),  
čárkovaně 95% pravděpodobnost

## 3.4 Jednoduchý prediktivní algoritmus závlahy

Cílem této kapitoly je vyvinout a ověřit prediktivní algoritmus závlahy, který by mohl z běžně dostupné denní předpovědi počasí dopočítat nutné množství závlahy.

Tento algoritmus by měl ušetřit investici jak do měřicího systému (senzory vlhkosti substrátu), tak do případných oprav a výměn segmentů vegetace. Taktéž by mělo dojít ke snížení dlouhodobé spotřeby vody, jelikož by měla úplně zamezit odtoku přebytečné vody zpět do kanalizace.

První regresní model denního množství evapotranspirace (kapitola 3.3) vycházel z denní průměrné teploty venkovního vzduchu a denní dávky ozáření na rovinu fasády. Denní průměrná hodnota teploty venkovního vzduchu je běžnou informační součástí předpovědi počasí. Koncentraci nasycené vodní páry lze dopočítat z průměrné denní teploty. Denní dávka globálního solárního ozáření fasády ale běžnou součástí předpovědi počasí není. Proto je třeba nejprve navrhnout model, který tuto veličinu bude schopný z předpovědi počasí vypočítat.

### 3.4.1 Predikce denní dávky solárního záření

Cílem této podkapitoly je za použití známých vzorců zanalyzovat výpočet  $H_{Gh}$ , tedy denní dávky globálního solárního ozáření na vodorovnou rovinu, ze známých teplot okolního prostředí. Tuto analýzu následuje pokusné zkoumání, zda lze tuto metodu upravit a aplikovat na výpočet  $H_{Gt}$ , globálního solárního záření na rovinu fasády.

#### 3.4.1.1 Výpočetní model - $H_{Gh}$

Byl zvolen výpočetní model Bristow and Campbell, který z mnoha využívaných prediktivních modelů ozáření vychází jako jeden z nevhodnějších [21]. Vzorec vypadá takto:

$$H_{Gh} = H_{Eh}A[1 - \exp(-B\Delta T_{ae}^C)] \quad [\text{Wh/m}^2\text{den}] \quad (14)$$

kde  $H_{Gh}$  je predikovaná veličina denní dávky globálního solárního ozáření horizontální plochy.  $H_{Eh}$  [Wh/m<sup>2</sup>den] je denní dávka extraterestriálního záření horizontální plochy. Toto záření reprezentuje dopadající paprsky na vnější hranici atmosféry naší planety a je proměnné se vzájemnou polohou Země a Slunce a vyosení zemské osy.

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Hodnota  $H_{Eh}$  má nicméně tu výhodu, že ji není třeba měřit, dá se dopočítat pro každé místo na planetě. Pro tento krok byl využit excel, který vytvořil Ing. Kamil Staněk, Ph.D. pro svou dizertační práci [22], a který poskytl vedoucí této práce.

$\Delta T_{ae}$  je rozdíl maximální a minimální denní teploty. Tato proměnná byla spočítána následovně:

$$\Delta T_{ae} = T_{ae,max(i)} - \frac{T_{ae,min(i)} + T_{ae,min(i+1)}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (15)$$

kde  $T_{ae,max(i)}$  je maximální teplota počítaného dne,  $T_{ae,min(i)}$  ta nejnižší a  $T_{ae,min(i+1)}$  je nejnižší teplota dne následujícího.

Neznámé konstanty A,B a C jsou hledanými parametry, které jsou pro každou lokalitu na zemi rozdílné. Pro výpočet byla využita lokalizace a data z meteorologické stanice v pražské Ruzyni, která je k UCEEB ČVUT a experimentální vertikální zahradě nejbližší (přibližně 8,7 km vzdušnou čarou). Jedná se o hodinové hodnoty teploty a globálního solárního ozáření horizontální roviny v průměrném roce. Tyto hodnoty byly dále upravovány tak, aby vyhovovaly podmínkám výše zmíněných rovnic.

#### 3.4.1.2 Výsledky regrese - $H_{Gh}$

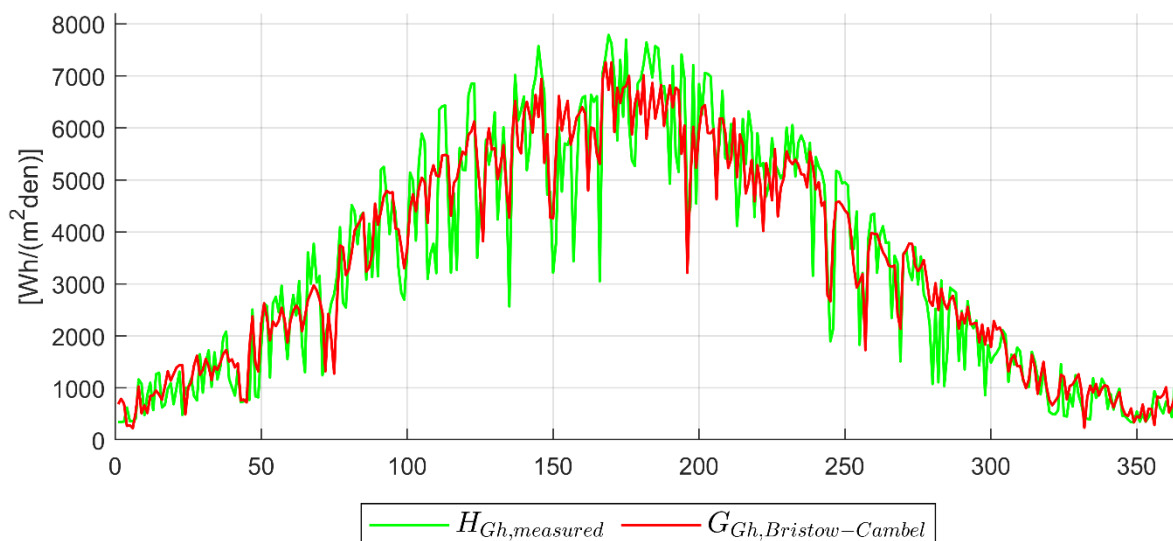
Pro výpočet byl opět použit program Matlab 2019, přesněji nelineární regresní analýza. Ta se obdobně jako regresní metoda lineární snaží iteračním způsobem nastavit hledané parametry tak, aby výstupy získané výsledné rovnice co nejvíce odpovídaly hodnotám reálným. Bylo provedeno několik pokusů s různými startovacími hodnotami, všechny skončily stejným výsledkem:

Hledaný parametr	A	B	C
hodnota parametru	0,67981	0,21861	0,84852
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>90,29 %</b>		
MAPE	23,43 %		
MABE	520,54		Wh/m <sup>2</sup> den

Tabulka 11 – Výsledky nelineárního regresního modelu  $G_{Gh}$

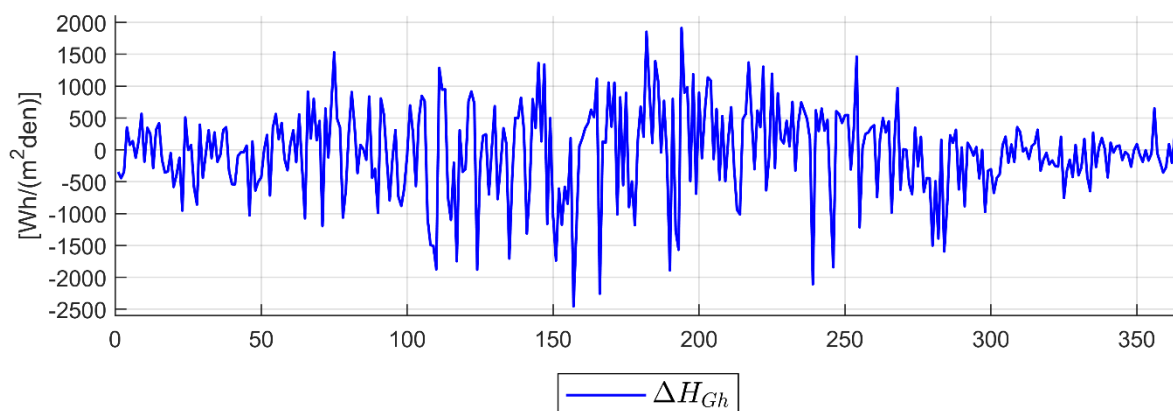
Regrese se dá považovat za úspěšnou, koeficient determinace je přes 90 %. Střední průměrná absolutní chyba je 23,43 %. Výsledky jednotlivých dnů byly zpracovány do grafu:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 15 – Porovnání denních dávek globálního solárního ozáření na horizontální rovinu

Jak je vidět, model relativně odpovídá reálným hodnotám. Vyšší rozdíly vznikají hlavně proto, že model není schopen kopírovat výkyvy způsobené oblačností v jednotlivých dnech. Samotné rozdíly viz graf 16:



Graf 16 – Rozdíly mezi měřenou a vypočítanou denní dávkou ozáření

#### 3.4.1.3 Upravený výpočetní model – $H_{Gt}$

Pro výpočetní modely evapotranspirace bylo nicméně uvažováno s denní dávkou ozáření na skloněnou rovinu fasády  $H_{Gt}$ . Cílem této podkapitoly je tedy upravit model Bristow and Campbell tak, aby bylo možno predikovat hodnoty globálního ozáření na fasádu.

Nejprve byla nahrazena výsledná proměnná  $H_{Gh}$  za vypočtenou  $H_{Gt}$ . Ta byla získána přepočtem z hodinových hodnot ozáření  $G_{Gh}$ , přičemž byl uvažovaný vertikální úhel 90 %

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

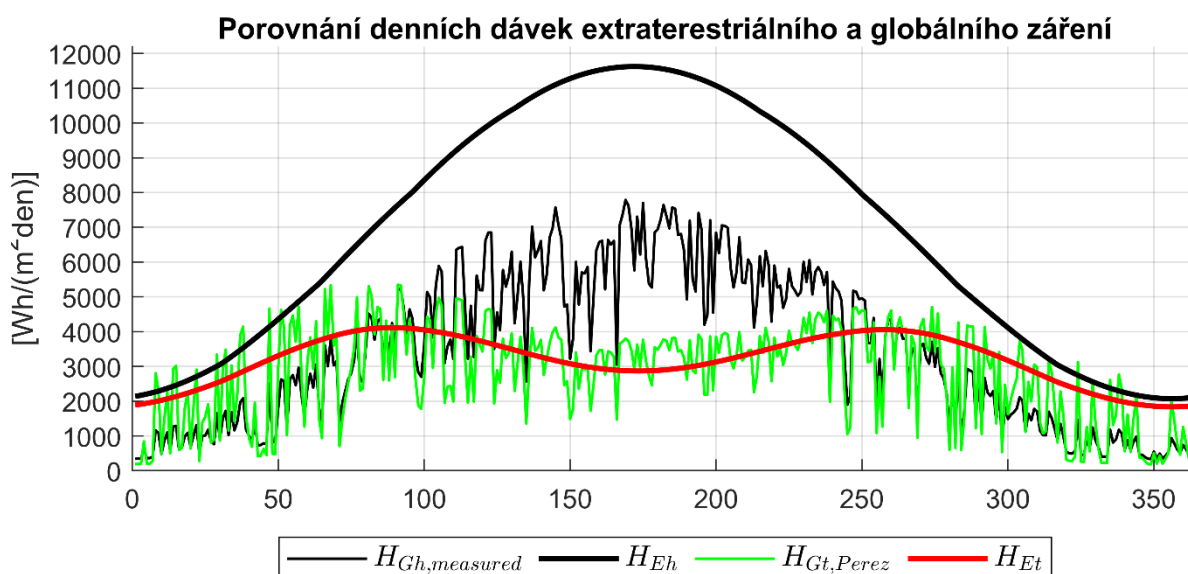
a horizontální 65 % směrem na západ, tedy natočení experimentální fasády. Hodnoty byly opět získány z excelu Ing. Staňka, Ph.D. Excel zde využívá k přepočtu horizontálního ozáření na ozáření roviny s určitým natočením Perezův model [23].

Při bližším pohledu na rovnici (14) je zřejmé, že hlavní proměnou pro výpočet globálního ozáření je právě záření extraterestriální, které je až následně upravené teplotou. Pro správný průběh výsledných hodnot je tedy nutné, aby vstupní extraterestriální záření tvarem křivky odpovídalo předpokládanému záření  $H_{Gt}$ . Z toho důvodu byla denní dávka extraterestriálního záření na horizontální plochu  $H_{Eh}$  nahrazena obdobným zářením na upravenou rovinu  $H_{Et}$ , tedy hypotetickou rovinu se stejným natočením jako experimentální fasáda, jen umístěná na vnější hranu atmosféry.

Pro tento krok byla využita další geometricky spočitatelná proměnná, a to hodinová hodnota úhlu dopadu záření na fasádu. Tato hodnota prezentuje, jaký úhel je v určité hodině mezi paprskem reálným a paprskem, který je ve všech osách kolmý na počítanou rovinu. Hodinová hodnota  $G_{Et}$  byla tedy spočítána vynásobením hodinové hodnoty  $G_{Eh}$  a kosinem hodinové hodnoty tohoto úhlu, tedy:

$$G_{Et} = G_{Eh} \cos(\theta) \quad [\text{W/m}^2] \quad (16)$$

Pro prezentaci úpravy extraterestriálního záření byla vybrána fiktivní jižní fasáda, na které se úprava záření projevuje nejvíce, a to z důvodu, že v letních měsících na fasádu dopadá slunce ve velkém úhlu, který tak poníží celkové denní ozáření fasády. Viz graf 17:



### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

**Graf 17** – Porovnání denních dávek extraterestriálního a globálního ozáření

$H_{Et}$  zde neodpovídá reálným fyzikálním hodnotám, hodnota denní dávky ozáření v prostoru na hraně atmosféry by měla být vyšší než na povrchu Země. Nicméně pro rovnici (17) je hlavní trend této proměnné v čase, který kopíruje průběh výsledné funkce  $H_{Gt}$ .

Rovnice denní dávky ozáření fasády pro nelineární regresi vypadá následovně:

$$G_{Gt} = G_{Et}A[1 - \exp(-B\Delta T_{ae}^C)] \quad [\text{Wh/m}^2\text{den}] \quad (17)$$

#### 3.4.1.4 Výsledky regrese – $H_{Gt}$

Výsledné hodnoty parametrů A, B, a C pro experimentální fasádu v Buštěhradu viz tabulka 12:

		Hledaný parametr	A	B	C
		hodnota parametru	1,18503	0,17854	1,1080
celý rok	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>73,70 %</b>			
	MAPE	38,75 %			
	MABE	552,3876	Wh/m <sup>2</sup> den		
1. duben až 1 říjen	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>71,14 %</b>			
	MAPE	21,97 %			
	MABE	576,8054	Wh/m <sup>2</sup> den		

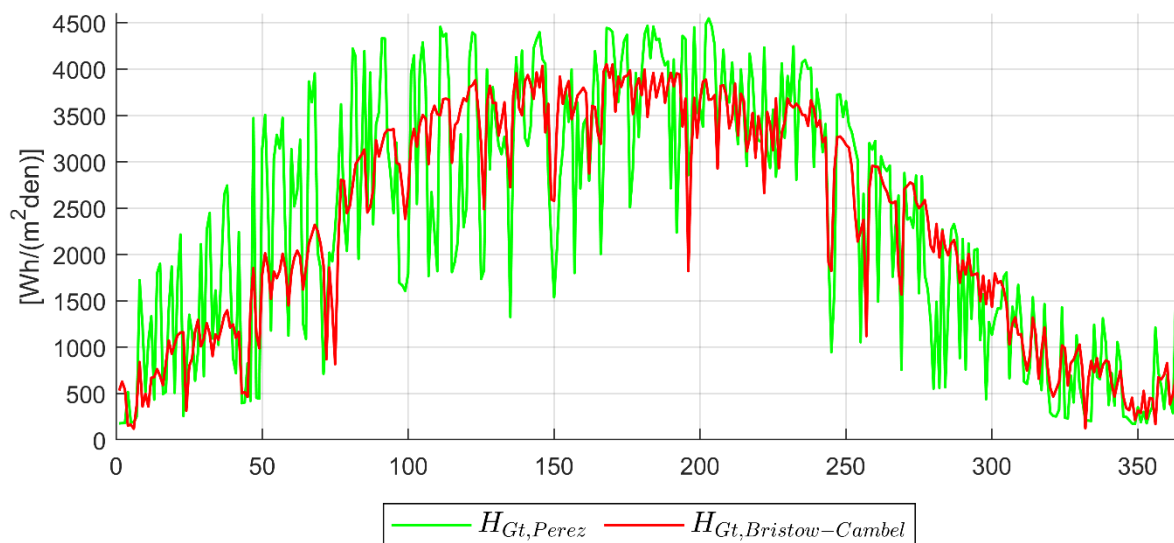
**Tabulka 12** – Výsledky nelineárního regresního modelu pro experimentální fasádu

Výsledky se zdají být vzhledem k problematice výpočtu poměrně dobré, hlavně v období léta, kdy je tato hodnota kritická pro dobré fungování fasády, je absolutní procentuální odchylka přibližně 22 procent.

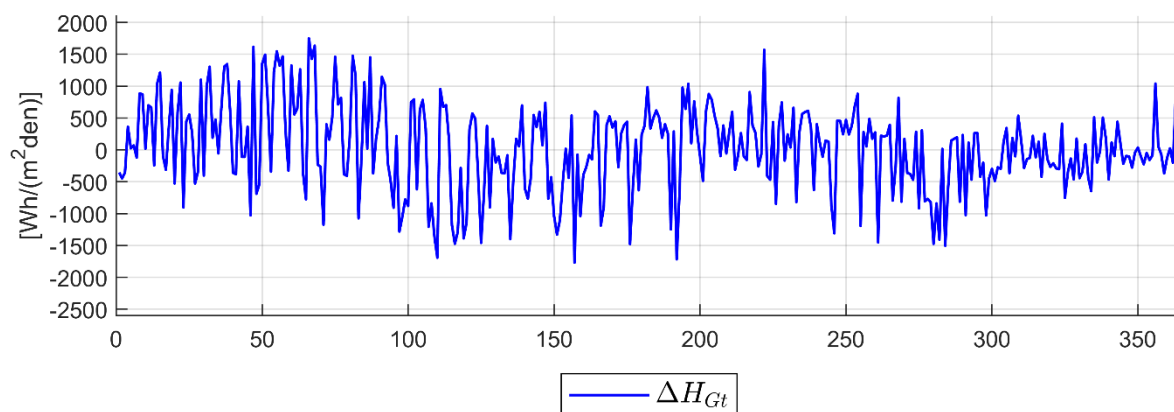
Taktéž byly vytvořeny grafy, které zobrazují průběhy predikovaných hodnot výpočtem dle Perezova modelu (se znalostí vstupního horizontálního globálního ozáření a teploty) a regresního modelu dle rovnice (17) (pouze znalost teploty).



### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 18 – Porovnání denních dávek globálního solárního ozáření na rovinu experimentální fasády



Graf 19 –  $H_{Gt}$ , rozdíly mezi měřenou a vypočítanou denní dávkou ozáření

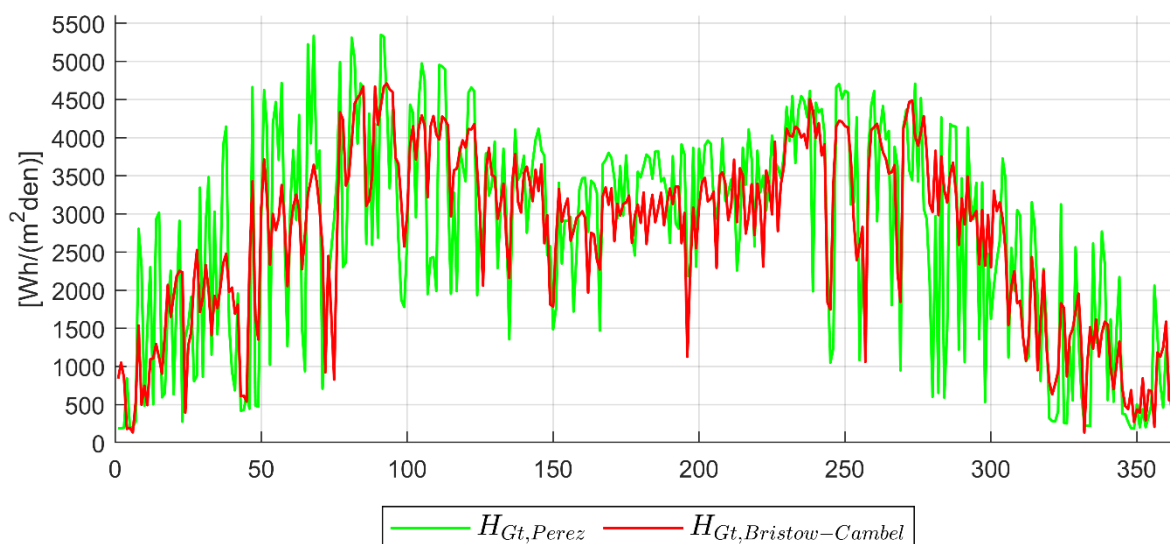
Taktéž byla dopočítány parametry rovnice (17) pro fasádu natočenou na různé světové strany. Výsledky koeficientů a statistické vyhodnocení viz následující tabulka 13:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Světová strana		V	JV	J	JZ	Z
Parametr	A	2,336	1,271	1,194	1,165	1,262
	B	0,183	0,129	0,094	0,128	0,302
	C	0,494	1,026	1,267	1,227	0,908
celý rok	R <sup>2</sup>	<b>79,49 %</b>	<b>68,35 %</b>	<b>60,99 %</b>	<b>67,56 %</b>	<b>79,80 %</b>
	MAPE	27,95 %	45,17 %	50,31 %	45,09 %	28,10 %
	MABE	409,44	603,48	691,25	626,29	426,91
1. duben. až 1. říjen	R <sup>2</sup>	<b>73,51 %</b>	<b>63,24 %</b>	<b>57,24 %</b>	<b>65,67 %</b>	<b>76,62 %</b>
	MAPE	23,24 %	24,27 %	21,52 %	21,31 %	21,17 %
	MABE	526,94	612,82	589,00	584,71	509,32

Tabulka 13 – Výsledky nelineárních regresních modelů  $H_{Gt}$  pro světové strany

Z výsledků je patrné, že kvalita regrese klesá s natočením fasády směrem k jihu. Jak bylo zmíněno výše, jižní fasáda má díky pohybu slunce vyšší zisky v zimě, a naopak nižší v létě. To už bylo vyřešeno úpravou vstupních proměnných. Nicméně Perezův model hlavně na jaře a na podzim vykazuje větší rozdíly mezi jednotlivými denními hodnotami ozáření. Tyto výkyvy způsobuje oblačnost, která ovlivňuje hodnoty globálního solárního ozáření na horizontální rovinu a se kterými tento model pracuje. Model od Bristowa a Campbella tyto výkyvy není schopen předvídat. Viz graf 20, který srovnává tyto dva modely právě na jižní fasádě.



Graf 20 – Porovnání denních dávek globálního solárního ozáření na jižní fasádní rovinu

Nicméně všechny modely jsou v letních měsících dostatečně přesné, jejich absolutní procentuální odchylka není v období 1. duben až 1. říjen vyšší než 25 procent.

### 3.4.2 Predikce závlahy z předpovědi teploty venkovního vzduchu

Se znalostí rovnic a do nich vstupujících koeficientů, zjištěných v předchozích kapitolách, bylo možno přistoupit k vytvoření finálního modelu, který by měl být schopen predikovat množství závlahy na m<sup>2</sup> fasády pouze z teploty okolí. Tento model by měl pracovat s běžnou předpovědí počasí pro následující den či dny, tedy očekávanou denní průměrnou teplotou venkovního vzduchu a denním maximem a minimem teploty venkovního vzduchu.

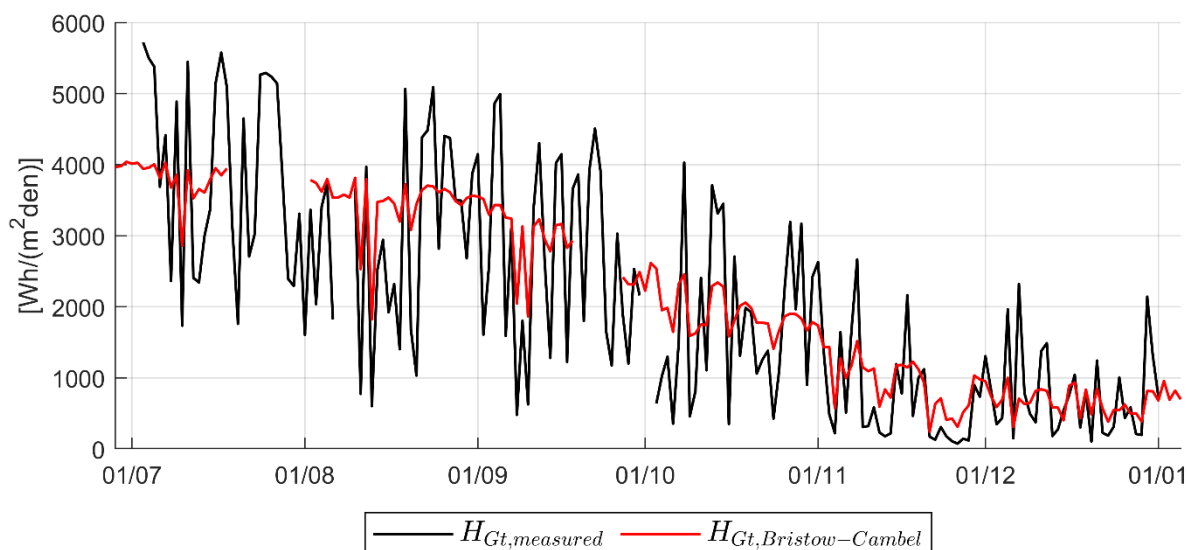
Pro výpočet a zhodnocení výsledné evapotranspirace byl zvolen následující postup

- 1) Vypočítání koncentrace nasycené vodní páry za pomoci rovnice (7) využívající průměrných denních teplot.
- 2) Vypočítání denní dávky globálního solárního ozáření roviny fasády využitím vzorce (16) využívající rozdíl minimální a maximální teploty a extraterestriálního záření na rovinu fasády, získaného rovnicí (17). Pro rovnici (16) jsou využívány koeficienty z tabulky 12, případně 13.
- 3) Vypočítání evapotranspirace z rovnice (8) s regresí zjištěnými koeficienty z tabulky 8, dle zkoumaného pole a časového úseku. Do rovnice (8) jsou vnořeny proměnné vypočítané v bodech 1 a 2.
- 4) Vypočítaná evapotranspirace je porovnána s evapotranspirací, která byla zjištěna dle kapitoly 3.1, přesněji vzorcem (1).

#### 3.4.2.1 Posouzení ozáření na experimentální fasádě

Na experimentální fasádě je měřeno globální solární ozáření fasádní roviny, je tedy záhodno nejprve tyto hodnoty konfrontovat s připraveným modelem, který ozáření predikuje. Tento model tentokrát pracuje s teplotami naměřenými u fasády na UCEEB ČVUT. Pro připomenutí, model ozáření byl kalibrován na hodnoty meteorologické stanice v Ruzyni, nikoli na měřené hodnoty v Buštěhradu. Porovnání reálných a modelových hodnot ozáření zde:

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady



Graf 21 – Porovnání ozáření experimentální fasády

Je vidět, že model odpovídá dlouhodobým trendům ozáření, nicméně není příliš přesný v predikci vysokých, či naopak nízkých hodnot odchylojících se od průměru.

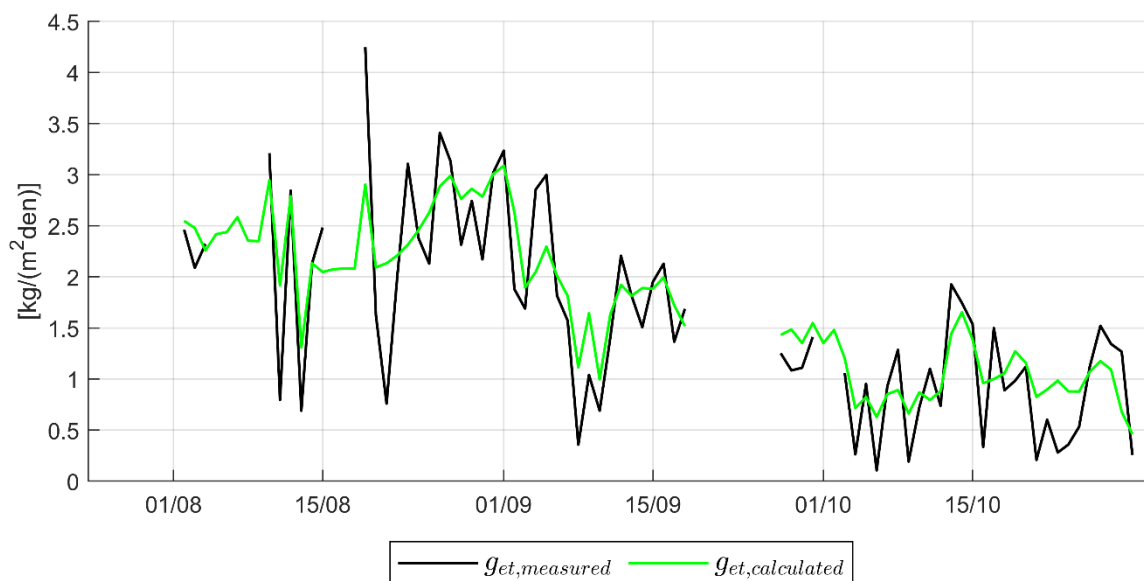
#### 3.4.2.2 Posouzení evapotranspirace na experimentální fasádě

Nejdříve byl uvažován jako referenční soubor dat upravený soubor 1, a to z pole S3a a celého analyzované období od 1. srpna do 28. října. Poté byl jako referenční soubor uvažován upravený soubor 3 z pole S3b, a to ve stejném časovém období. Pro každé období a pole byly využity příslušné koeficienty spočítané regresní metodou.

Pro každý soubor byly spočítány dvě sady statistických hodnot, a to pro celý úsek od 1.8. do 28.10. a pro z hlediska závlahy zajímavější úsek od 1.8. do 15.9. Obě sady vychází ze stejných souborů dat, jelikož regresí vypočtené roviny jsou si velmi podobné a je zbytečné počítat pro jednotlivé úseky vícekrát (viz grafy 13 a 14, kde se přímky celého úseku a prvního úseku v zásadě rovnají).

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

#### 1) Pole S3a, období od 1. srpna do 28. října



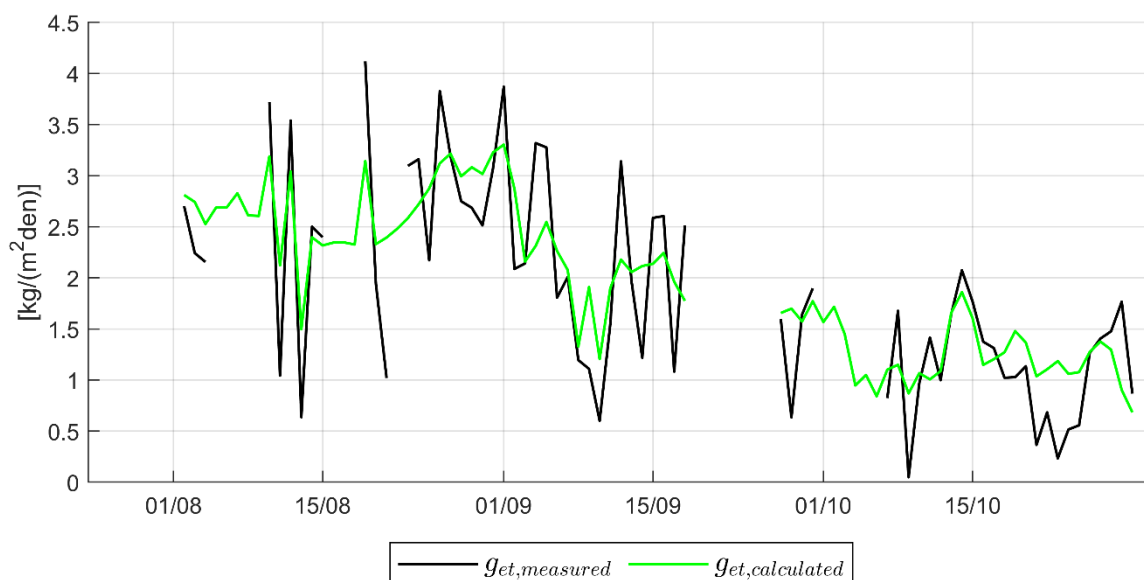
Graf 22 – S3a, porovnání vlhkostního toku evapotranspirací

Statistické výsledky zde:

celý úsek	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>74,76 %</b>	
	MAPE	50,33 %	
	MABE	0,361	kg/m <sup>2</sup> den
1. 8. až 15. 9.	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>71,90 %</b>	
	MAPE	30,78 %	
	MABE	0,406	kg/m <sup>2</sup> den

Tabulka 14 – Statistické vyhodnocení evapotranspirace v poli S3a

#### 2) Pole S3b, období od 1. srpna do 15. září



Graf 23 – S3b, porovnání vlhkostního toku evapotranspirací

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Statistické výsledky zde:

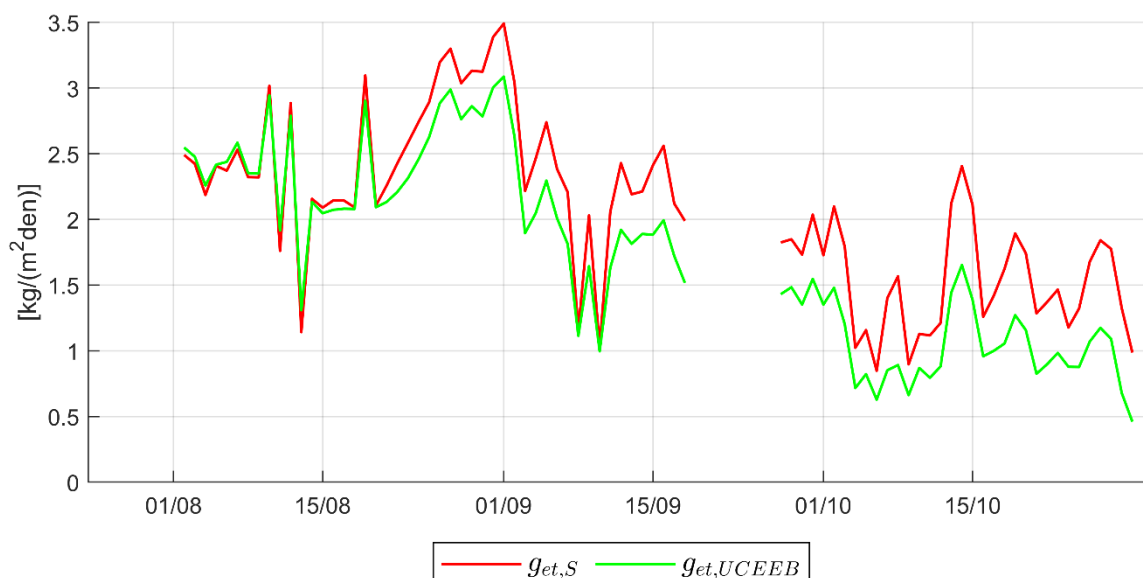
celý úsek	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>68,70 %</b>	
	MAPE	62,70 %	
	MABE	0,440404	kg/m <sup>2</sup> den
1. 8. až 15 9.	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>66,98 %</b>	
	MAPE	31,33 %	
	MABE	0,519	kg/m <sup>2</sup> den

Tabulka 15 – Statistické vyhodnocení evapotranspirace v poli S3b

Soubor S3a vykazuje lepší výsledky než S3b, a to jak v kompletním, tak časově omezeném období. Hodnota absolutní procentuální odchylky je v obou souborech přibližně 30 %. Hodnota absolutní chyby 0,4, resp. 0,5 kg závlahy na m<sup>2</sup> za den se zdá být stále použitelná.

Dalším pokusem bylo nasimulovat množství nutné závlahy pro hypotetickou fasádu, která by byla natočená přesně na jih. Byly využité hodnoty přepočtu denní dávky globálního solárního ozáření na rovinu fasády dle podkapitoly 3.4.1.3, přesněji vzorců (16) a (17), jejichž výsledkem jsou koeficienty z tabulky 13. Pro výpočet evapotranspirace byly využity regresí získané koeficienty z pole S3a.

Průběh evapotranspirace byl následně porovnán s predikovanou evapotranspirací experimentální fasády:

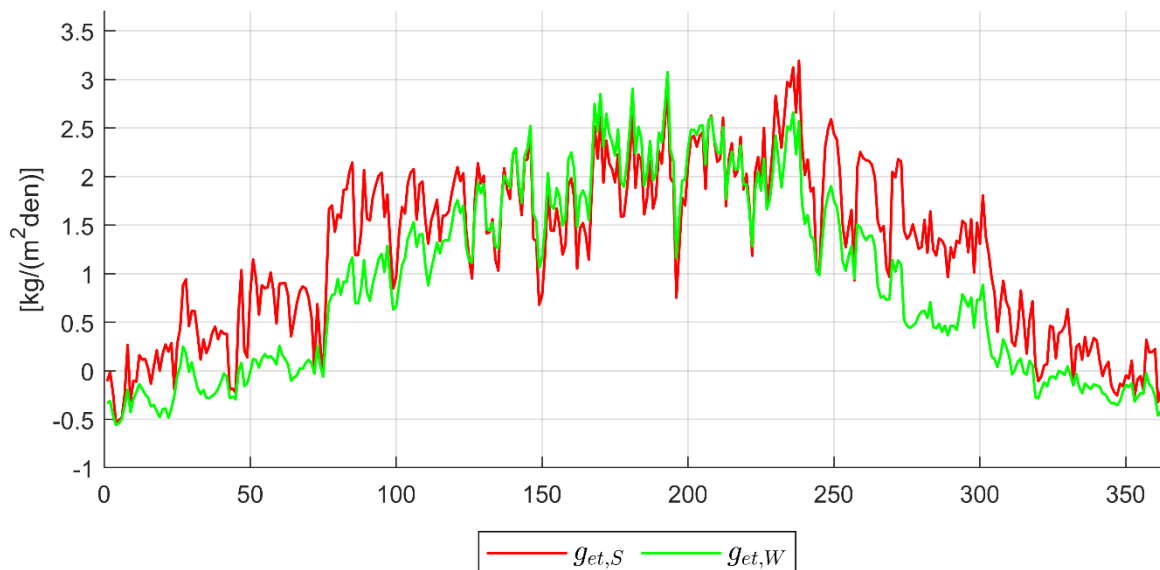


Graf 24 – Porovnání evapotranspirace UCEEB fasády a hypotetické jižní fasády

### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Z grafů je jasně vidět zvýšené množství evapotranspirace v září a říjnu, kdy na jižní fasádu dopadá více slunečních paprsků než na fasádu experimentální (natočenou o 65° na západ).

Posledním pokusem bylo porovnat jižní fasádu s fasádou natočenou o 90° od jihu, pro tento pokus fasádu západní. Hodnoty teplot byly získány z meteorologické stanice v Ruzyni. Výsledky jsou následující:



Graf 25 –Porovnání evapotranspirace jižní a západní fasády

Je zřejmé, že se zde kombinují vlivy ozáření fasády, která je v jarních a podzimních měsících vyšší na fasádě jižní, a vliv koncentrace nasycené vodní páry, která je naopak vyšší v letních měsících. Proto v letních měsících nedojde ke zploštění až poklesu tak, jako je vidět v ročním grafu ozáření jižní fasády (graf 20).

Negativní hodnoty evapotranspirace jsou způsobeny výpočetním modelem. V reálném stavu nebude v zimních měsících docházet k evapotranspiraci žádné.

## 3.5 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola se zabývala vertikální zahradou, jejíž experimentální řešení je postaveno na UCEEB ČVUT. Byla provedena analýza aktuálního systému závlahy a změřených dat, ze kterých byla vyčíslena reálná evapotranspirace fasády. Byla také potvrzena souvztažnost evapotranspirace a některých okrajových podmínek, teploty venkovního vzduchu a denní dávky globálního ozáření roviny fasády. Fasáda je schopná v letním období spotřebovat až 0,4 kg vody na metr čtvereční fasády za hodinu. Taktéž byla krátce popsána ochlazovací schopnost fasády kvůli evapotranspiraci. Evapotranspirace kompenzovala přibližně třetinu dopadajícího solárního záření na fasádu.

Následně byl vytvořen prediktivní model evapotranspirace, který se opíral o množství dat, které byly na experimentální fasádě naměřeny. Byly vypočteny korelační koeficienty mezi jednotlivými veličinami. Modely byly statisticky ohodnoceny. Koeficient determinace byl u nejpřesnějšího regresního modelu nad 90 %. Zároveň absolutní chyba každého odhadu evapotranspirace byla okolo 0,2 kg/(m<sup>2</sup>den), tedy přibližně 18 % odchylka. Taktéž byla zjištěna problematická predikce při podzimních okrajových podmínkách, při kterých regresní metoda vykazuje výrazně nižší hodnoty validity.

Hlavním cílem kapitoly byl model, predikující evapotranspiraci z pouhé denní předpovědi počasí. Tento model vycházel z načerpaných znalostí z předchozích úkonů, převážně z prediktivního modelu představeném v předchozím odstavci.

Bylo v něm třeba nahradit v běžné situaci nezjistitelnou hodnotu denního ozáření na nakloněnou rovinu modelem, který ji bude predikovat v závislosti na natočení fasády. Tento pozměněný Bristow-Campbell model ozáření pracuje s koeficientem determinace od 60 do 80 %, v závislosti na natočení ke světovým stranám, přičemž při natočení k jihu validita výpočtu klesá. Nicméně pro všechna modelovaná natočení byla v relevantních měsících (od dubna do října) procentuální odchylka od naměřených hodnot do 25 %, tj. přibližně do 600 Wh/(m<sup>2</sup>den).

Výsledný model evapotranspirace, pracující s pouhou teplotou jako jedinou známou veličinou, vykazuje vyšší míru nejistoty než model pracující s přesně změřenou hodnotou ozáření fasády. Kvalita regrese se pohybuje okolo 70 %. Výsledné hodnoty ale nejsou nepoužitelné, model se pohybuje v relevantních měsících s absolutní chybou do 0,5 kg závlahy na metr čtverečný za den. Taktéž absolutní procentuální odchylka je okolo 30 %.



### 3 Vodní bilance vertikální zahrady

Fasáda má reálně určitou schopnost vyrovnávat tyto výkyvy, nicméně je otázkou, zda by v některých extrémních dnech nedošlo k přelití, či naopak nedostatečnému zalití vegetace. Taktéž předpověď počasí nebývá vždy přesná, bylo by třeba vymyslet určitou korekci z naměřených teplotních dat, které by zpětně dopočítaly evapotranspiraci znovu. Z rozdílu předpovědi počasí a následného měření by se dalo dopočítat, kolik vody by se mělo před dalším cyklem do fasády přivést navíc, či naopak o kolik by se měla hodnota závlahy na další den snížit.

## 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

### 4.1 Úvod

Jak je zmíněno v úvodu této práce, experiment, ze kterého tato práce čerpá, je navržen jako komparativní měření několika druhů halových fasád. Byla vytvořena 4 testovací pole. Pole S1 je tradiční řešení halové fasády, kdy na stěně, která má tepelně izolační a nosnou funkci, je na kontakt umístěný trapézový plech. Varianta S2 uvažuje stejný plech, nicméně mezi ním a vnitřní stěnou je vytvořena provětrávaná vzduchová mezera. Varianta S3a a S3b je v předchozí kapitole analyzovaná vertikální zahrada, tedy modulární koše se substrátem a vegetací, které jsou od vnitřní stěny odděleny vzduchovou mezerou identickou s polem S2. Bližší informace o skladbách je možno nalézt v kapitole 2.

Díky množství senzorů, které byly umístěny do jednotlivých polí, je možné sledovat rozdílné teplotní chování jednotlivých variant. Cílem této kapitoly je tedy naměřené hodnoty zanalyzovat a poskytnout čtenáři představu o potenciálních výhodách jednotlivých řešení z hlediska tepelné techniky.

Kapitola je dělená na čtyři části. V prvních dvou oddílech jsou nejprve fasády srovnávány z hlediska vnějšího opláštění. V první části jsou porovnány tradiční skladby S1 a S2, na kterých je vidět vliv větrané dutiny. Druhá část se zabývá porovnáním dvou systémů s větranou dutinou S2 a S3, kde by měl být zřetelný vliv vegetace na teplotu v dutině. Třetí část je zaměřena na vliv jednotlivých fasád na vnitřní prostředí budovy. V závěrečné kapitole je hlavním cílem analýza výpočtu součinitele prostupu tepla z naměřených hodnot, která nastolila několik zajímavých otázek.

### 4.2 Porovnání naměřených hodnot

Fasáda byla měřena přibližně od začátku července, přičemž hlavně období léta je ještě poznamenané optimalizací experimentu, je zde tedy několik výpadků v měření. Pro analýzu byla zvolena dvě referenční období, a to od 8. do 14. srpna pro letní období a od 1. do 10. prosince pro období zimní. To jsou období, kdy všechny sběrnice dat fungovaly a jsou kompletní datové sady. V kapitole 4.2.3.2 je navíc přidáno období 22. – 31.7., kdy sice vypadl jeden z datotakerů, ale naměřená data jsou velmi zajímavá a pro zkoumanou

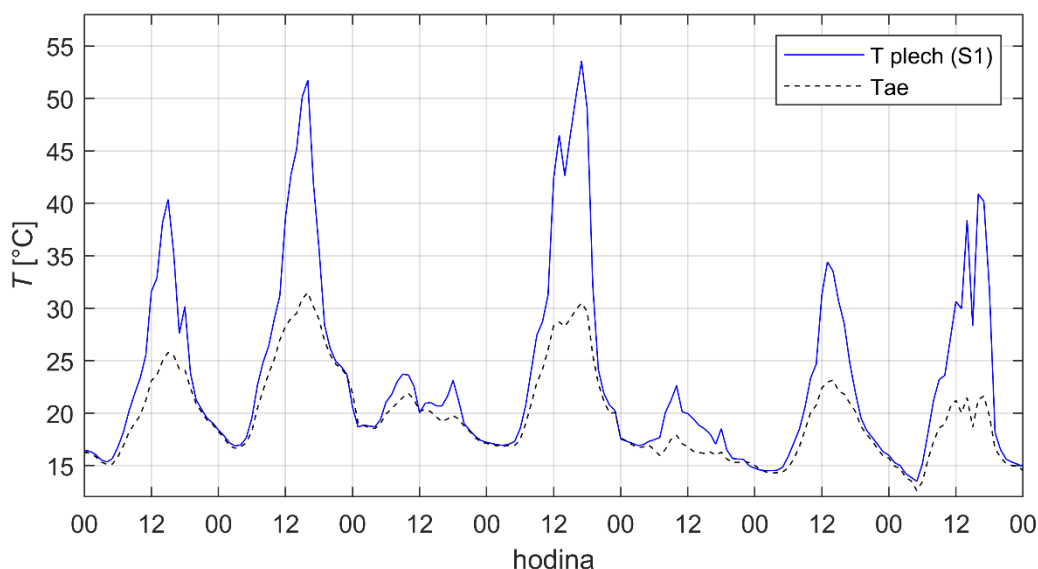
#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

oblast teploty a tepelných toků není problém nefunkční sběrnice (která sbírala data z vertikální zahrady) podstatný.

Následující grafy odkazují na senzory, které měří zkoumané veličiny na několika různých místech fasády. Umístění těchto senzorů je, společně s jejich specifikací, uvedeno v kapitole 2.

##### 4.2.1 S1 vs. S2 – tradiční řešení a výhody větrané dutiny

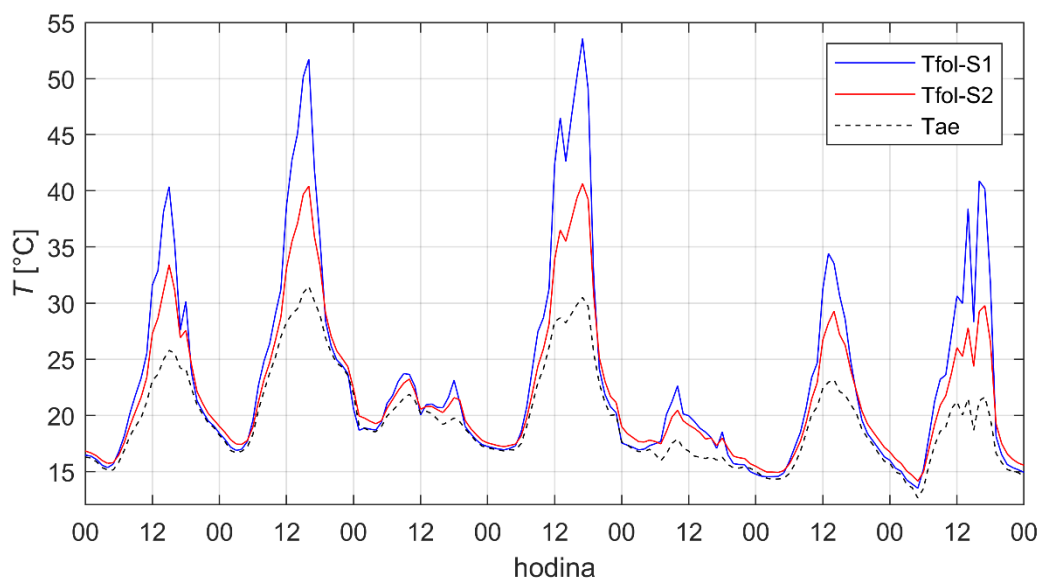
Fasády S1 i S2 jsou zvenku opláštěny trapézovým plechem, který je hlavně v odpoledních hodinách výrazně ohříván solárními paprsky. Jak je vidět na grafu 26, měřené hodnoty teploty plechu na fasádě S1 jsou v odpoledních hodinách až o přibližně 23 °C vyšší než teploty exteriéru.



Graf 26 – Teplota na vnitřní straně plechu, letní období (8.8. – 14.8.)

Na grafu 27 je naopak jasně vidět vliv větrané dutiny. Teploty naměřené na paropropustné folii na vnější hraně vnitřní stěny jsou u řešení s větranou dutinou (S2) výrazně nižší, vnitřní stěna se tedy tolik nepřehřívá. Větraná dutina odebírá teplo z přehřívajícího plechu a odvádí ho (alespoň částečně) ven z dutiny proudícím vzduchem. Přenos tepla už není hlavně vedením jako ve variantě S1, ale prouděním (pohyb vzduchu v dutině) a sáláním (přenos teploty radiací z povrchu na povrch).

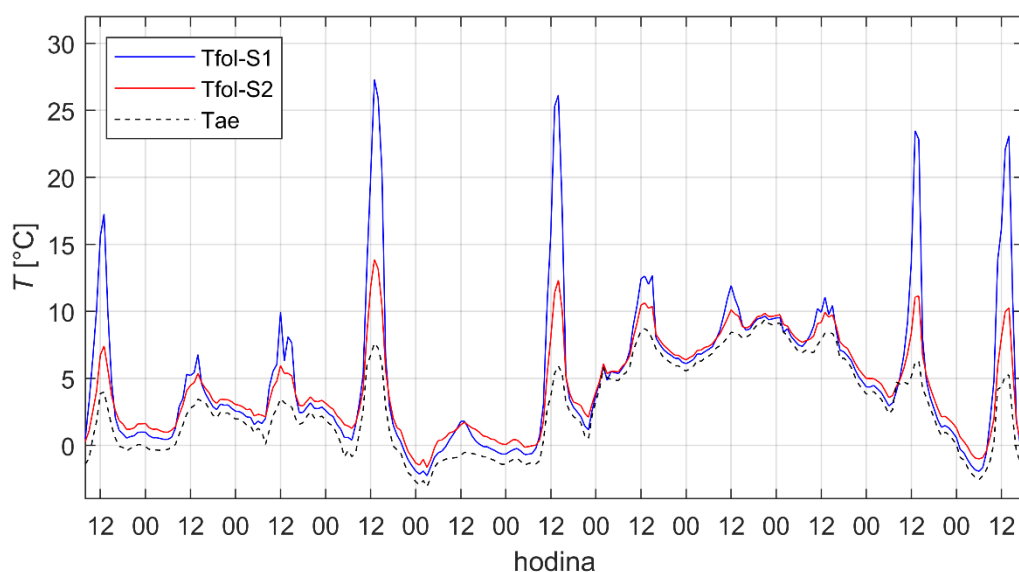
#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla



Graf 27 – S1 vs. S2, teplota na vnější hraně vnitřní stěny, letní období (8.8. – 14.8.)

Obdobné ohřívání plechu se dá vypočítat i na datech ze zimního období (graf 28), kdy je fasáda krátkodobě vystavována slunečnímu ozáření. Z důvodu natočení fasády na západ dochází k tomuto přehřívání v odpoledních hodinách.

V zimním období je opět vidět rozdíl v naměřených hodnotách mezi jednotlivými řešeními S1 a S2, fasáda S1 je v době ozáření fasády ohřívána více. Naopak v nočních hodinách jsou hodnoty teplot na fasádě S2 vyšší. Tento rozdíl může být způsoben tím, že fasáda S2 není tolik náchylná na odebrání tepla sáláním směrem k obloze.



Grafy 28 – S1 vs. S2, teplota na vnější hraně vnitřní stěny, zimní období (1.12. – 11.12.)

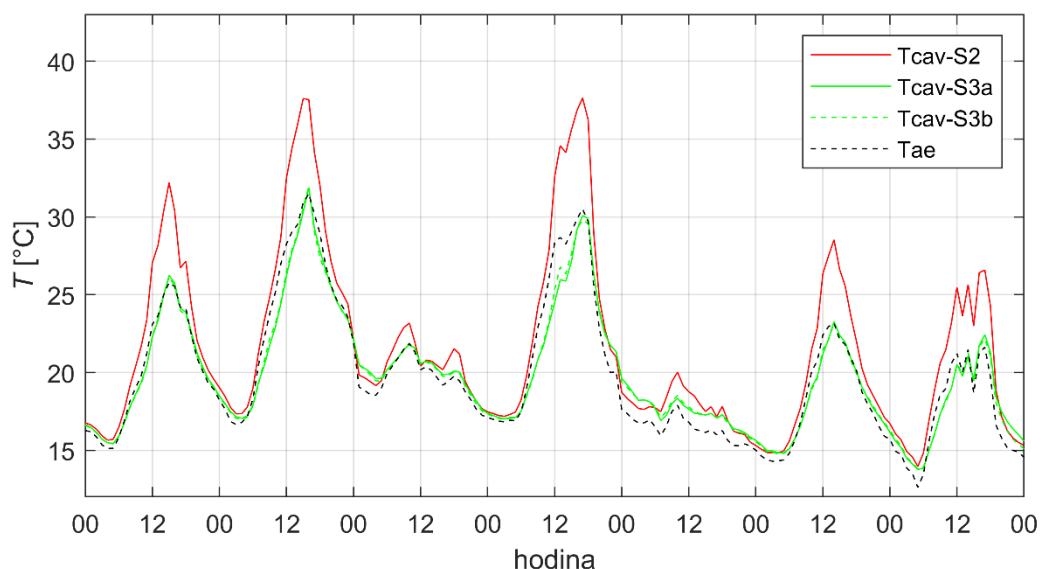
## 4.2.2 S2 vs. S3 – vliv vertikální zahrady na větranou dutinu

Jak bylo naznačeno v kapitole 3.2.1 (Chladící výkon fasády), fasáda osazena vertikální zahradou je díky odparu vody z rostlin a substrátu (evapotranspirací) schopna vrátit část tepla, které na ní dopadá ve formě solárního záření, zpět do exteriéru ve formě vodní páry. Toto latentní teplo přeměny vody na páru by mělo nějakým způsobem ovlivnit jak teplotu ve větrané dutině, tak i teplotu vnitřní stěny.

Zároveň je třeba uvažovat samotnou tepelnou kapacitu košů se substrátem, které by se měly v nočních hodinách ochladit a poté (hlavně v dopoledních hodinách) odebírat teplotu z dutiny. Taktéž by se měla vzít v potaz teplota přiváděné závlahové vody, která bude nepochybně nižší než teplota exteriéru.

Pro analýzu vlivu jednotlivých fasád S2 a S3 na hranu vnitřní stěny je třeba nejdříve prostudovat chování vzduchu v dutině. Teplota byla měřena na třech místech, nahoře, dole a ve středu dutiny. Bylo taktéž měřeno proudění ve středu dutiny, nicméně tato hodnota byla měřena pouze absolutně, neposkytuje tedy informaci o směru proudění vzduchu v dutině.

První graf znázorňuje porovnání teplot jednotlivých větraných fasád ve středu výšky dutiny:



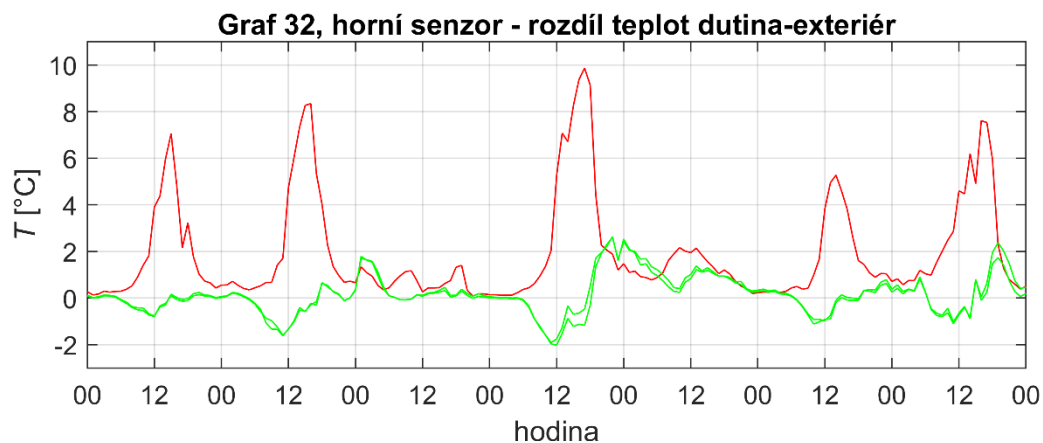
Graf 29 – S2 vs. S3, teplota vzduchu ve středu dutiny (8.8. – 14.8.)

Hodnoty teplot vzduchu ve středu dutiny jsou u fasády S2 očekávaně vyšší než v exteriéru. Vzduch je od plechu ohříván a proudí v dutině nahoru.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Naopak interpretace hodnot teplot v dutinách S3a a S3b je komplikovanější. Dutina se patrně ochlazuje od vertikální zahrady a vnitřního povrchu, které z dutiny odebírají teplo. Vzduch by měl v dutině proudit dolů.

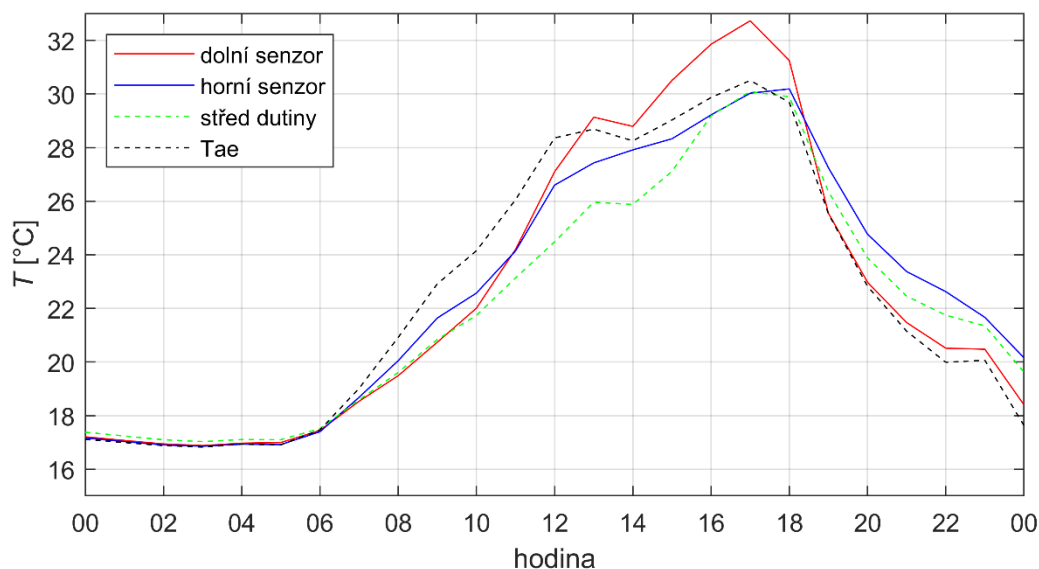
Je ale třeba vzít v potaz teplotní profil po výšce dutiny. Rozdíly teplot horního a dolního senzoru jsou záporné (graf 30). Teplota dole v dutině je tedy vyšší než nahoře. To ale vytváří rozpor. Pokud fasáda odebírá teplo dutině (a vzduch klesá), teplota by měla odpovídat průběhům fasády S2, tedy že teplota nahoře by měla být vyšší než dole.



Grafy 30 až 32 – S2 vs. S3, rozdíly teplot (8.8. – 14.8.)

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Na grafech 31 a 32, které ukazují rozdíly mezi teplotou exteriéru a měřeného okraje dutiny, je vidět, že na místě vstupu i výstupu začne v odpoledních hodinách teplota překračovat hodnoty exteriéru. Při bližším pohledu na teplotní profil dutiny po výšce při jednom velmi teplém dni (graf 33) je nesrovnalost vidět detailněji:



Graf 33 – S3a, průběhy teplot po výšce dutiny 11. 8. 2019

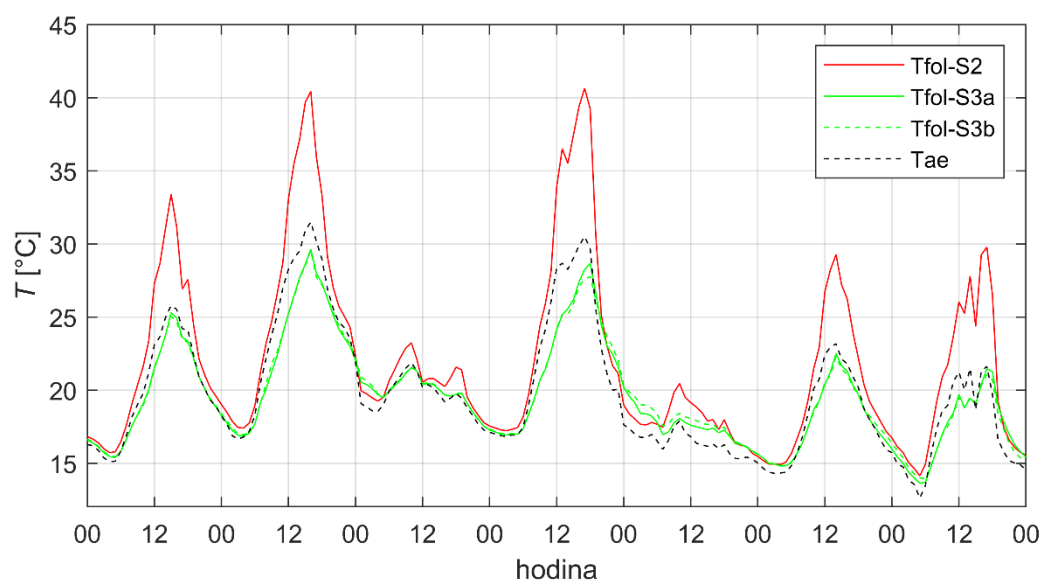
Následující předpoklady je třeba brát surčitým nadhledem, rozdíly teplot naměřené jednotlivými senzory jsou malé. Tento den se nicméně dá rozdělit do tří časových úseků:

- 1) Dopoledne od 6:00 do 11:00. V tuto dobu na fasádu dopadá difuzní solární záření, vertikální zahrada je předchlazená nočními teplotami a ochlazuje vzduch v dutině pod hodnotu exteriéru. Vzduch v dutině tedy s vysokou pravděpodobností klesá.
- 2) Doba největšího solárního zisku od 11:00 do 18:00. V tuto dobu je chování vzduchu v dutině velmi těžko interpretovatelné. Střed dutiny je stále pod hodnotou exteriérové teploty, naopak jak horní, tak dolní sensor zaznamenávají teploty vyšší než ve středu dutiny. V odpoledních hodnotách teplota na dolním senzoru dokonce stoupá nad hodnotu exteriéru. Směr vzduchu je tedy v zásadě neodhadnutelný.
- 3) Večerní a noční hodiny od 18:00 dále. Dolní sensor má nižší teplotu než horní, vertikální zahrada vrací část nabyté energie od slunce do dutiny. Teploty ve středu dutiny odpovídají tomuto předpokladu, jsou vyšší než exteriérové. Proudění vzduchu je směrem nahoru.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Na závěr polemiky o proudění vzduchu v dutině je třeba taktéž připomenout, že nezanedbatelný vliv hraje i rychlost a směr větru v okolí fasády.

To, co se však dá poměrně dobře zanalyzovat, je výsledný vliv těchto nejistých pochodů na vnitřní stěnu. Pro toto zhodnocení budou stejně jako v kapitole 4.2.1 využity teplotní senzory na vnějším líci vnitřní stěny (teplotní senzory umístěné na paropropustné folii):



Graf 34 – S2 vs. S3, teplota na vnější hraně vnitřní stěny, letní období (8.8. – 14.8.)

Při pohledu na graf 34 se dá s určitostí prohlásit, že hmota vertikální zahrady, na rozdíl od fasády S2, jenž je opláštěna plechem, plně odstraní solární zisky, které na fasádu dopadají.

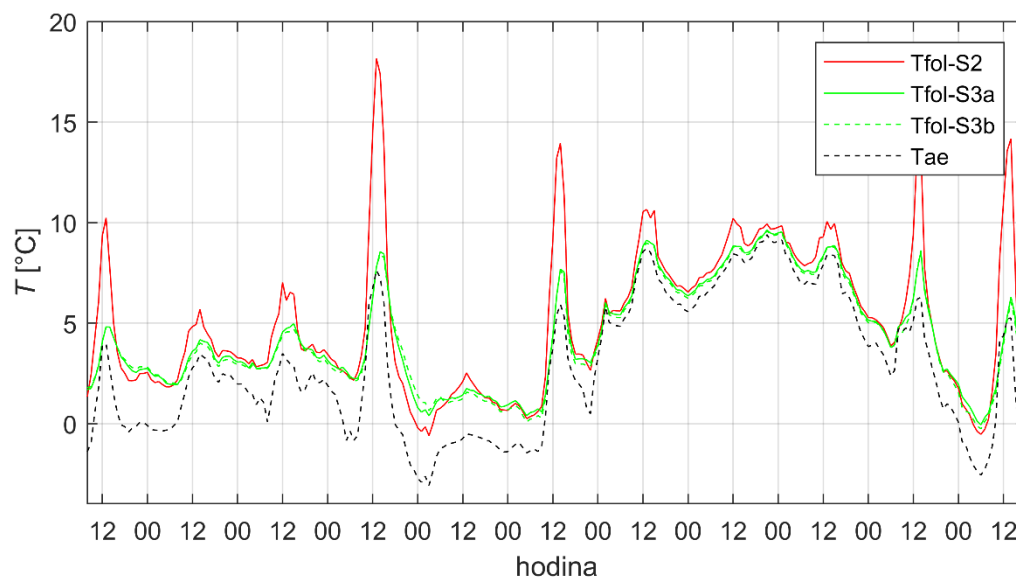
Dá se taktéž prohlásit, že teplota vnějšího líce vnitřní stěny se v teplých denních hodinách dostává pod hodnotu exteriéru. Je ale otázkou, co způsobuje toto ochlazení. Můžeme předpokládat, že vertikální zahrada odebírá část tepla z vnější hrany vnitřní stěny právě přes vzduch v dutině. Nelze však zjistit, který pochod v zelené fasádě tento pokles způsobuje, zda chladnější substrát, evapotranspirace rostlin nebo kombinace obojího.

Naopak v nočních hodinách naměřily senzory na vnější hraně stěny o něco vyšší hodnoty než v exteriéru. To je pravděpodobně způsobeno tím, že substrát je po denní době prohřátý a předává energii zpět do dutiny. Zároveň je teplota v exteriéru nižší než teplota v interiéru, tudíž je část tepla přenášena vnitřní stěnou zevnitř k vnější hraně stěny, kde je senzor umístěn.



#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

V zimním období (graf 35) teploty obou fasád neklesají pod hodnotu exteriéru. Naopak jsou tyto hodnoty vyšší, což odpovídá předpokladu, že přes paropropustnou folii prochází teplo z interiéru.



Graf 35 – S2 vs. S3, teplota na vnější hraně vnitřní stěny, zimní období (1.12. – 11.12.)

V zimním období byl opět změřen u fasád S2 a S3 rozdílný průběh denních teplot. U fasády S2 je vliv denní špičky ozáření výraznější. Naopak u fasád S3a a S3b dochází k omezení vlivu ozáření. Na rozdíl od letních měsíců hodnoty neklesají pod hodnotu teploty exteriéru. To by se taktéž dalo vysvětlit prostupem tepla fasádou směrem zevnitř ven.

V době vegetačního klidu, zdá se, vertikální zahrada nemá žádný vliv na teplotu v dutině, což odpovídá předpokladu o ustání biologické aktivity rostlin. Navíc substrát není zaléván a odpar transpirací je taktéž minimalizován.

Je také opět vidět, že substrát v nočních hodinách odevzdává nastřádanou energii do dutiny, stejně jako v období letním.

#### 4.2.3 Vliv na vnitřní prostředí budovy

V předchozích kapitolách byla nabídnuta data z vnějšího líce vnitřní stěny, která poskytla určité porovnání reakcí jednotlivých skladebných řešení halových fasád na vnější okrajové podmínky. Data ze senzorů umístěných na vnitřní povrchu testovacích stěn by naopak

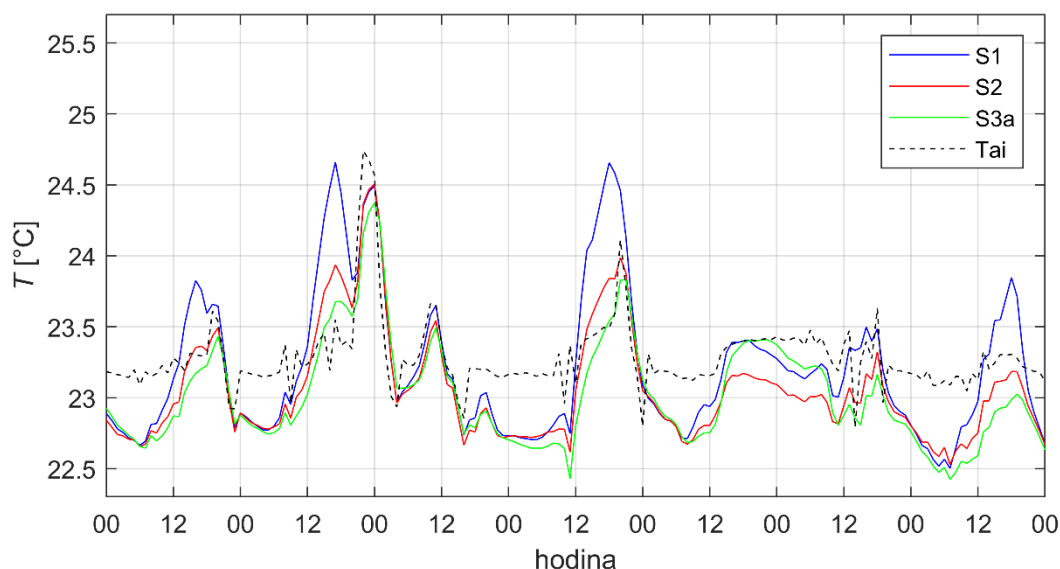
#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

měla poskytnout představu, jak se jednotlivá stavební řešení projevují na vnitřním povrchu.

##### 4.2.3.1 Teplota sádrokartonu

Sádrokartonový záklop byl osazen dvěma senzory. Sensor měřící vnitřní povrchovou teplotu je zatížen větším počtem neznámých vlivů (chování větrací jednotky, proudění vzduchu v místnosti), které ovlivňují naměřené teploty. Proto byly pro vzájemné porovnání využity senzory umístěné na exteriérové straně sádrokartonu, tedy v nevětrané vzduchové dutině. Ty jsou ovlivněny distribucí tepla v uzavřené dutině, horní sensor vykazuje teploty vyšší než sensor dolní. Následující hodnoty jsou tedy jejich průměrem.

Průběhy teplot v letním sledovaném období viz graf 36.



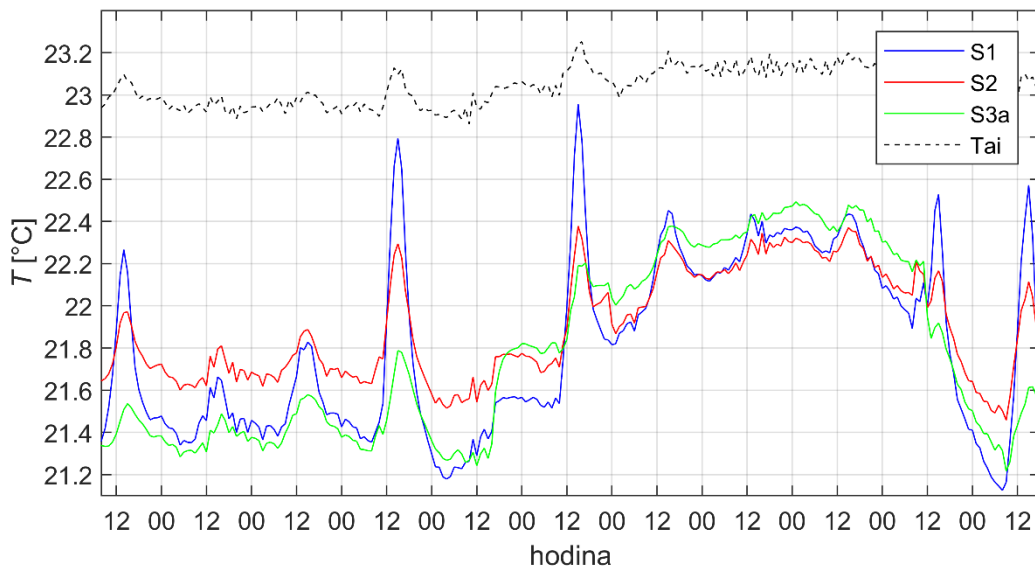
Graf 36 – Teplota stěny u interiéru, letní období (8.8. – 14.8.)

První zjištění je, že všechny senzory zaznamenaly špičkové teploty, způsobené přenosem tepla z exteriéru do vnitřní stěny. Zároveň je vidět, že nevětraná fasáda S1 vychází jako nejvíce náchylná na toto prohřívání. Nejméně je naopak ovlivněno pole osazené vertikální fasádou S3a.

Taktéž je patrné, že jsou tyto senzory ovlivněny i změnou teploty v interiéru. Tyto skoky, jejichž původ je neznámý, způsobí například v druhém sledovaném dni v pozdních večerních a nočních hodinách poměrně výrazný nárůst teploty uvnitř stěny.

V nočních hodinách jsou naměřené hodnoty všech tří variant obecně velmi podobné, pohybují se přibližně 0,5 °C pod hodnotou interiéru.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla



Graf 37 – Teplota stěny u interiéru, zimní období (1.12. – 11.12.)

I v zimním období (graf 37) má nejdynamičtější průběh fasáda S1. Na povrchové teplotě je nejvýrazněji znát změna okrajových podmínek v exteriéru, tedy ozáření fasády. Následuje varianta S2 a nejstabilnější je opět fasáda S3.

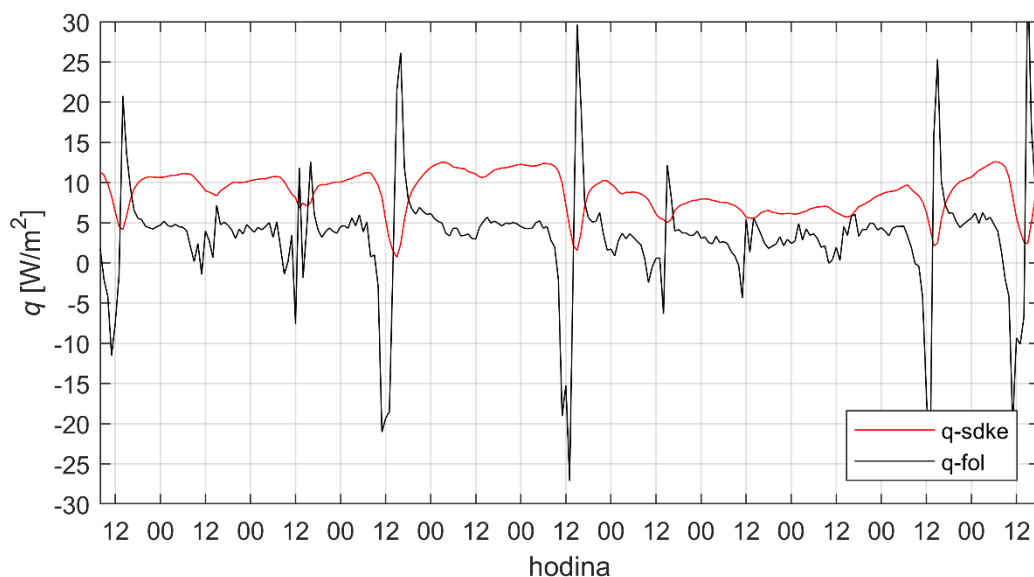
Co se týče dlouhodobých průběhů, je zajímavé, že se v první polovině zkoumaného úseku jeví nejlépe izolační fasáda S2, nicméně po druhém teplém dni ji vystřídá fasáda S3a. Samotná změna však probíhá mezi dvěma teplými dny. Jedná se ale o rozdíly velmi malé, na hraně chybovosti senzorů, je otázka, zda to není pouze nepřesnost měření.

#### 4.2.3.2 Hustota tepelného toku

Do každého pole fasády byly umístěny 2 senzory měřící hustotu tepelného toku. Jeden byl na vnější (směrem k exteriéru) straně vnitřního sádkartonového záklopu a druhý na vnější straně paropropustné folie, tedy mezi folií a trapézovým plechem (S1) nebo ve vzduchové dutině (S2 a S3).

Právě tento vnější senzor vykazuje, zdá se, špatné hodnoty. V zimních měsících, kdy se očekává tepelný tok z konstrukce ven, jsou hodnoty na tomto senzoru dlouhodobě nižší než na senzoru vnitřním. Tento rozdíl by ale neměl vznikat. Například v nočních hodinách, kdy tepelný tok není ovlivněn solárními zisky, by měly být v zásadě identické. Viz graf 38.

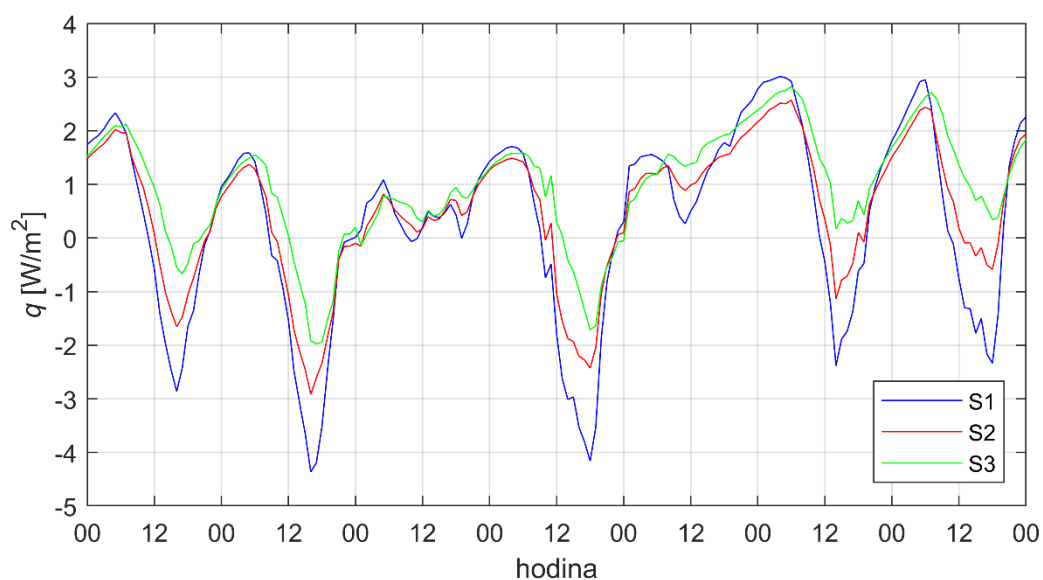
#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla



Graf 38 – S1, porovnání senzorů měřících tepelné toky, zimní období (1.12. – 11.12.)

Tato chyba je možná způsobena rozdílností tepelného odporu senzoru hustoty tepelného toku a odporu paropropustné fólie. Teplo patrně obtéká senzor a tepelný tok v místě senzoru je nižší než v místě bez senzoru. Z toho důvodu budou analyzovány hodnoty pouze z vnitřního senzoru.

Letní období je typické denním tokem tepla dovnitř do budovy, a to hlavně v odpoledních hodinách. Hustoty těchto toků jednotlivých zkušebních fasád jsou znázorněné na grafu 39.



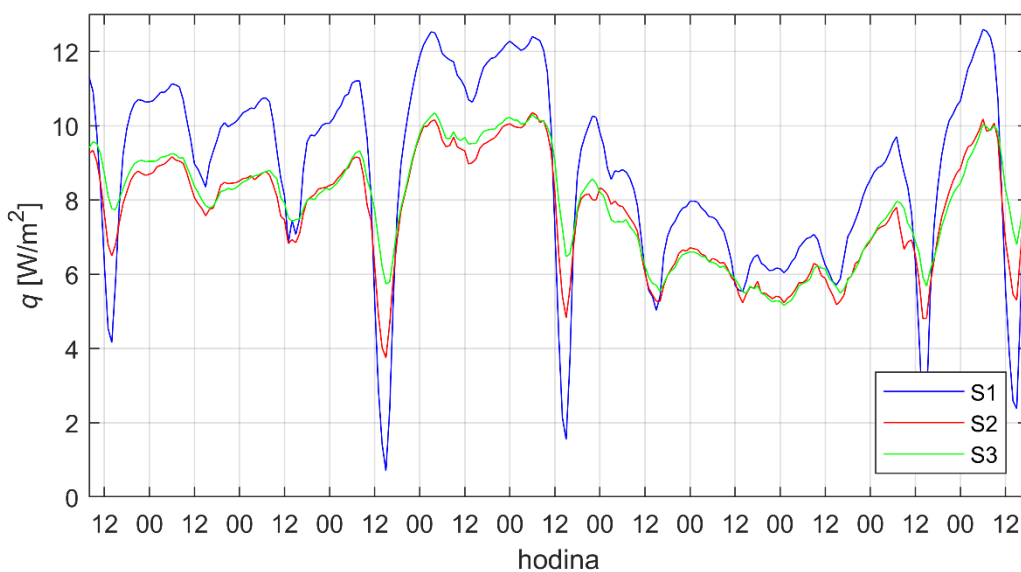
Graf 39 – Hustota tepelného toku, letní období (8.8. – 14.8.)

Je zde pozorovatelný rozdíl mezi jednotlivými řešeními. Fasáda S1 má v odpoledních maximech výrazně větší hustotu tepelného toku než S2 a S3. Zároveň fasáda S3 vykazuje

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

mírně nižší denní hodnoty hustoty tepelného toku než fasáda S2. To odpovídá rozdílům teplot v grafech 27 a 34 (teploty u senzorů blíže exteriéru), respektive 36 (senzory blíže interiéru).

V zimním období (graf 40) je situace přes den obrácená. Směr tepelného toku je zevnitř ven, přičemž přes den, kdy se k sobě teploty interiéru a exteriéru přibližují, jsou tepelné toky nižší. Díky prohřátí fasády S1 solárními tepelnými zisky se dokonce v odpoledních hodinách minimální hodnoty tepelného toku blíží nule. Zároveň stále platí odstupňování toků S1-S2-S3, tepelný tok u fasády S3 nejméně reaguje na denní ozáření.



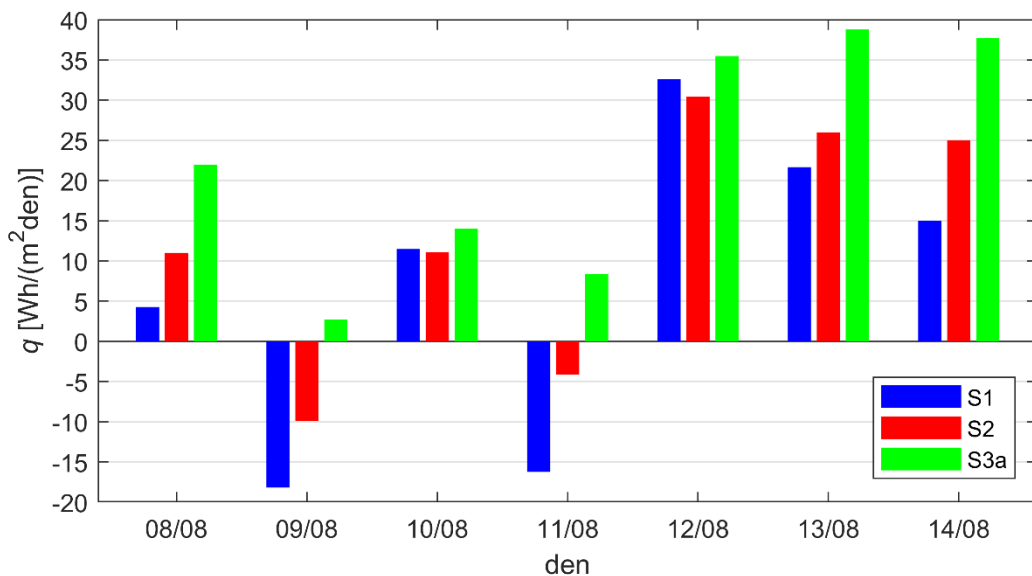
Graf 40 – Hustota tepelných toků, zimní období (1.12. – 11.12.)

Naopak v dopoledních a nočních hodinách se projevují horší izolační vlastnosti fasády S1, která postrádá dutinu. Hustoty tepelného toku na vnitřní straně variant S2 a S3 si jsou podobné. Tomu opět relativně odpovídají grafy 28 a 35, kde teploty na parotěsné fólii jsou u fasád S2 a S3 obdobné a u fasády S1 mírně nižší. Naopak hodnoty grafu 37 z vnitřních teplotních senzorů úplně neodpovídají hustotě tepelných toků z grafu 40. Jak bylo ale zmíněno výše, naměřené rozdíly teplot mezi jednotlivými fasádami jsou velmi malé, je možné, že se jedná o chybu měření.

Následně byly vytvořeny grafy znázorňující množství tepla, které prostoupilo za den jedním metrem čtverečným fasády (záporné hodnoty znamenají dodávku tepla do interiéru). Na grafu 41, zobrazující letní období, je vidět, že přes konstrukci S1 proudí v teplých dnech větší množství tepla do interiéru, než přes konstrukce S2 a S3. Z toho se

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

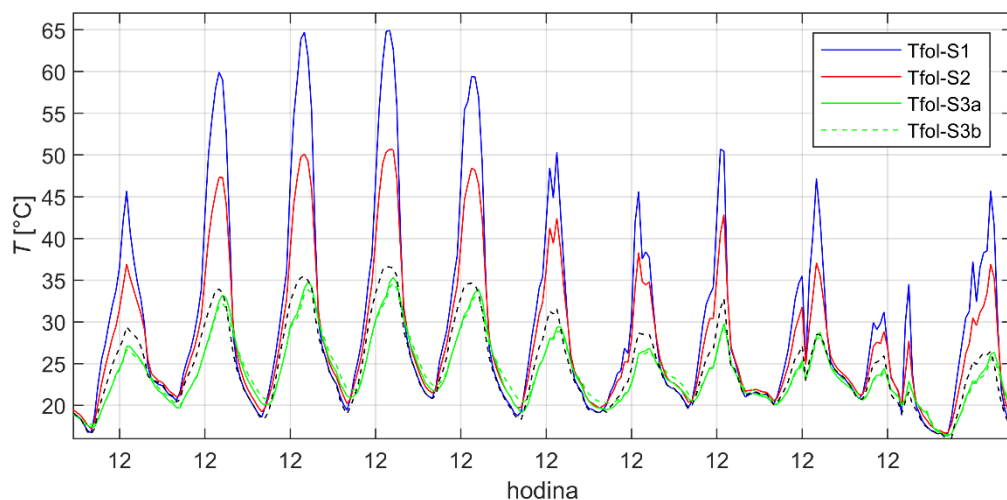
dá očekávat, že fasáda S1 bude nejvíce náchylná na letní přehřívání. Naopak fasáda S3 i v teplém 2. a 4. dni vykazuje pozitivní hodnoty.



Graf 41 – Denní prostup tepla, letní období (8.8. – 14.8.)

Graf logicky nezobrazuje další tepelné zisky (otvory v obálce, zařízení, lidé atd.), plusové hodnoty tedy neznamenají, že by bylo třeba v letních měsících dodávat teplo do budovy.

Pro lepší znázornění letního stavu byla taktéž zpracována data z extrémně teplého období 22. - 31. 7., které zobrazují denní prostupy tepla lépe, než původně využívaný úsek 8. - 14. srpna. Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly 4.2, tyto hodnoty nebyly využity v celé kapitole z důvodu výpadku zápisu hodnot do jedné ze sběrnic, datový balíček tedy ve sledovaném období není kompletní. Teploty a hustoty prostupu tepla naštěstí zaznamenány byly.

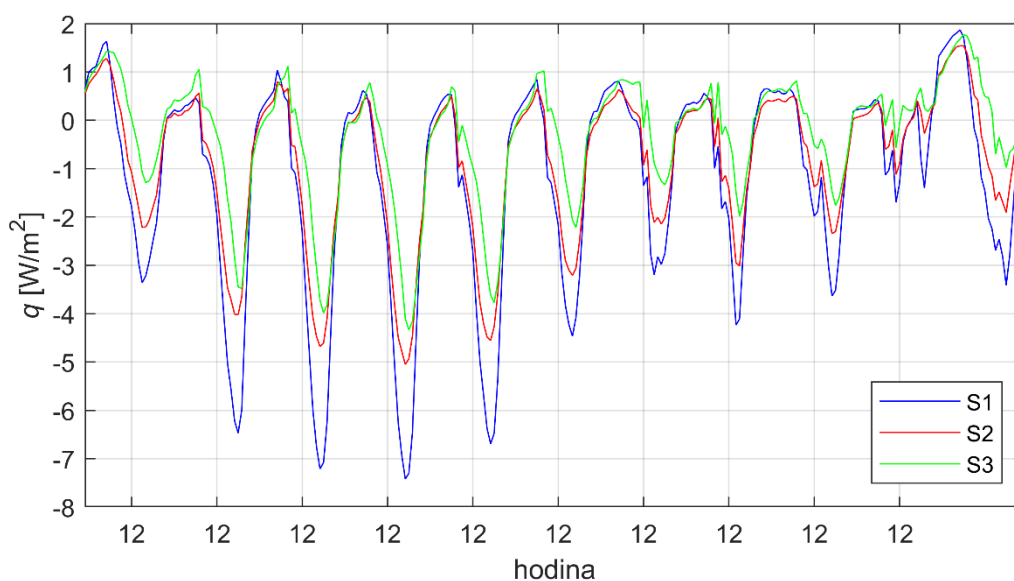


Graf 42 – Teploty na parotěsné fólii, extrémní hodnoty (22.7.-31.7.)

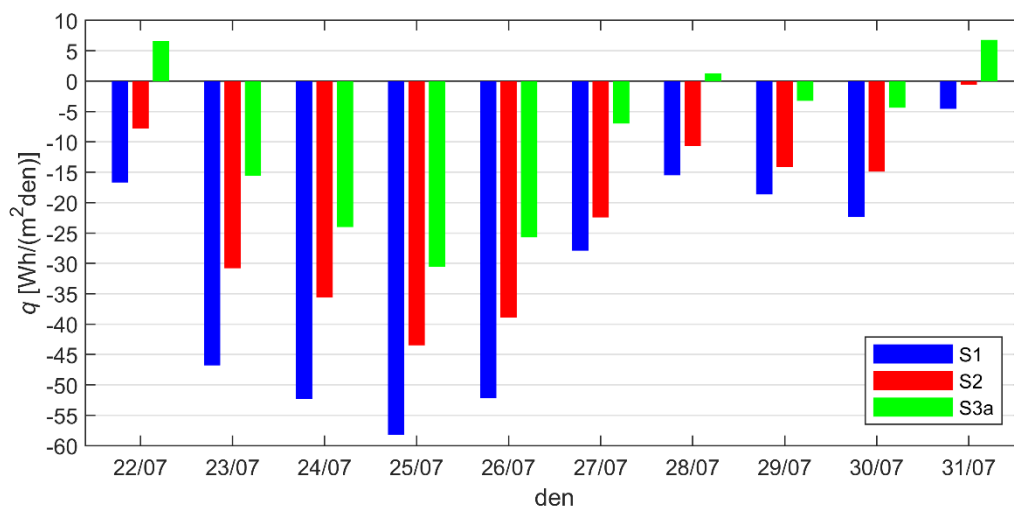
#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Graf 42 znázorňuje porovnání teplot u jednotlivých variant fasád. V grafu lze najít stejné trendy jako v původním sledovaném období 8.8-14.8., ať ten, že fasáda S1 vykazuje hodnoty nejvyšší a fasáda S3 nejnižší, tak i fakt, že právě poslední zmiňovaná varianta fasády má naměřenou hodnotu na vnější hraně vnitřní stěny nižší, než je teplota v exteriéru. Větraná dutina je tedy ochlazována. Všechny tyto trendy jsou zároveň výraznější (teplota fasády S1 dosahuje až 65 °C, teplota v dutině u fasády S3 je až o 5 stupňů nižší než v exteriéru).

Výsledné hustoty tepelných toků a denní prostupy tepla lépe ukazují rozdíly mezi jednotlivými testovacími fasádami.



Graf 43 – Hustota tepelného toku, extrémní hodnoty (22.7.-31.7.)

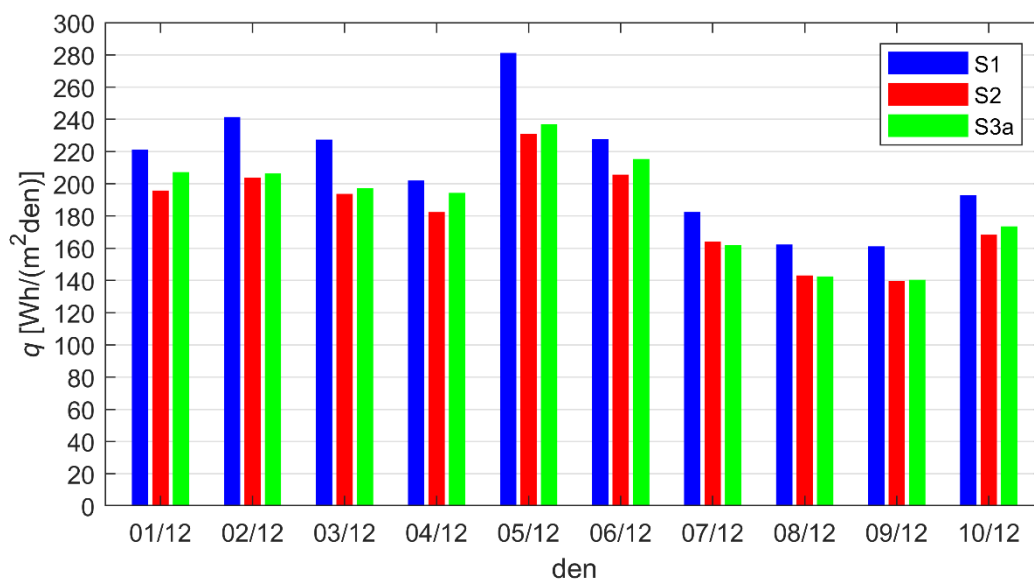


Graf 44 – Denní prostup tepla, extrémní hodnoty (22.7.-31.7.)

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Z grafů lze vyčíst, že v nejteplejší dny prochází jedním m<sup>2</sup> nevětrané fasády S1 přes 55 kWh/den, špičkové hodnoty hustoty tepelného toku jsou přes 7 Wattů na m<sup>2</sup>. Naopak prostup tepla fasádou S3 je v těchto dnech pod 30 kWh/den, špičkové hodnoty hustoty tepelného toku se pohybují okolo 4 Wattů/m<sup>2</sup>. Fasáda S2 je mezi těmito hodnotami, je zde jasně vidět, jak vliv větrané dutiny (S1 vs. S2) tak vliv vertikální zahrady (S2 vs. S3).

Co se týče sledovaného zimního období (graf 45), zde se rozdíly mezi jednotlivými fasádami stírají. Samotný prostup je řádově vyšší než v letních měsících, a to od 150 do 280 Wh/m<sup>2</sup> den. I když v odpoledních hodinách je fasáda S1 mnohem lépe schopná přenášet solární tepelné zisky do vnitřní konstrukce, její horší výsledky v nočních hodinách tento benefit negují. Rozdíl mezi S2 a S3 by se dal vysvětlit právě větší schopností fasády S2 přenést solární zisky do větrané dutiny.



Graf 45 – Denní prostup tepla, zimní období (1.12. – 11.12.)

#### 4.2.4 Součinitel prostupu tepla obvodové konstrukce

Tato kapitola se zabývá zjištěním součinitele prostupu tepla. Hned v úvodu je ale třeba podotknout, že je třeba brát identitu zde prezentovaných hodnot jako hodnotu součinitele prostupu tepla, který vychází ze vztahu:

$$q = U(T_{ai} - T_{ae}) \quad [W/m^2] \quad (18)$$

s určitou opatrností. Prostup tepla je závislý na několika dalších proměnných, které nejsou v tomto základním vzorci brány v potaz. První veličinou, která ovlivňuje prostup tepla, je vlhkost v konstrukci. Druhým faktorem je dynamika konstrukce. Ta reaguje v čase na

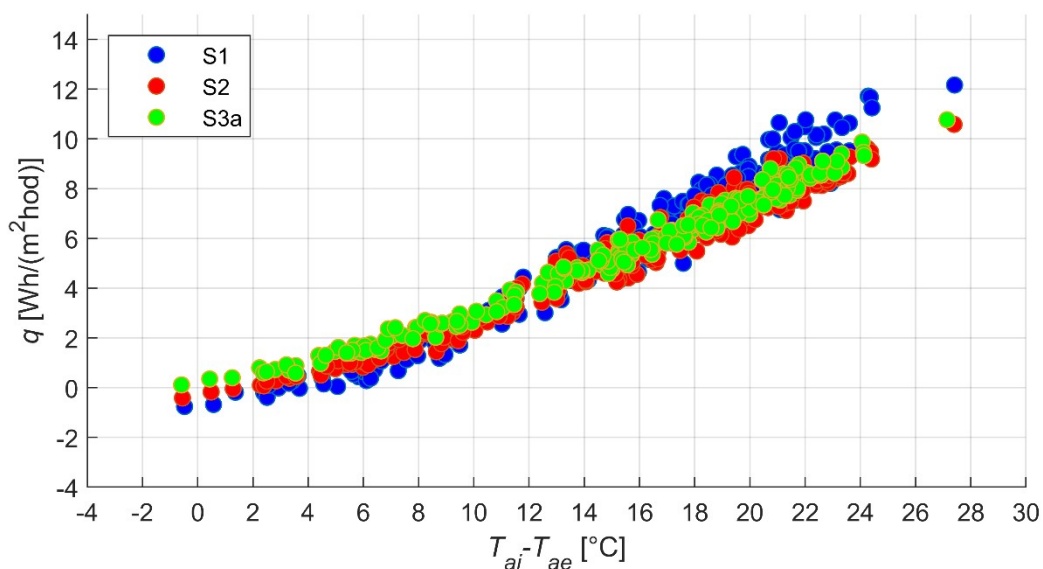


#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

změnu okrajových podmínek (ozáření, teplota, vlhkost) s určitým zpožděním. Při měření součinitele tepelné vodivosti jednotlivých materiálů, ze kterého výpočet součinitele prostupu tepla vychází, se pracuje s ustálenými podmínkami, které neodpovídají reálným podmínkám, kterým jsou stavby vystavovány.

##### 4.2.4.1 Součinitel prostupu tepla při uvažování dat z celého dne

Nejprve byl uvažován soubor dat, který zpracovával data naměřená během celého dne. Byly vytvořeny 24hodinové průměry teplot v exteriéru a interiéru. Jejich následným odečtením byl vytvořen denní rozdíl teplot, kterým je konstrukce vystavena. Taktéž byly vytvořeny 24hodinové průměry prostupu tepla každým typem konstrukce. Závislost hodnot prostupu tepla na rozdílu teplot viz graf 46:



Graf 46 – Závislost prostupu tepla na rozdílu teplot, interval 24 hodin

Následně byly lineárním regresním výpočtem zjištěny přímky podle rovnice 19:

$$q = b_0 + b_1 \Delta T \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (19)$$

kde parametr  $b_1$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] znázorňuje sklon přímky a zároveň veličinu velmi podobnou součiniteli prostupu tepla. Parametr  $b_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] je průsečík přímky s osou y

Výsledné hodnoty parametrů nabízí tabulka 16:

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

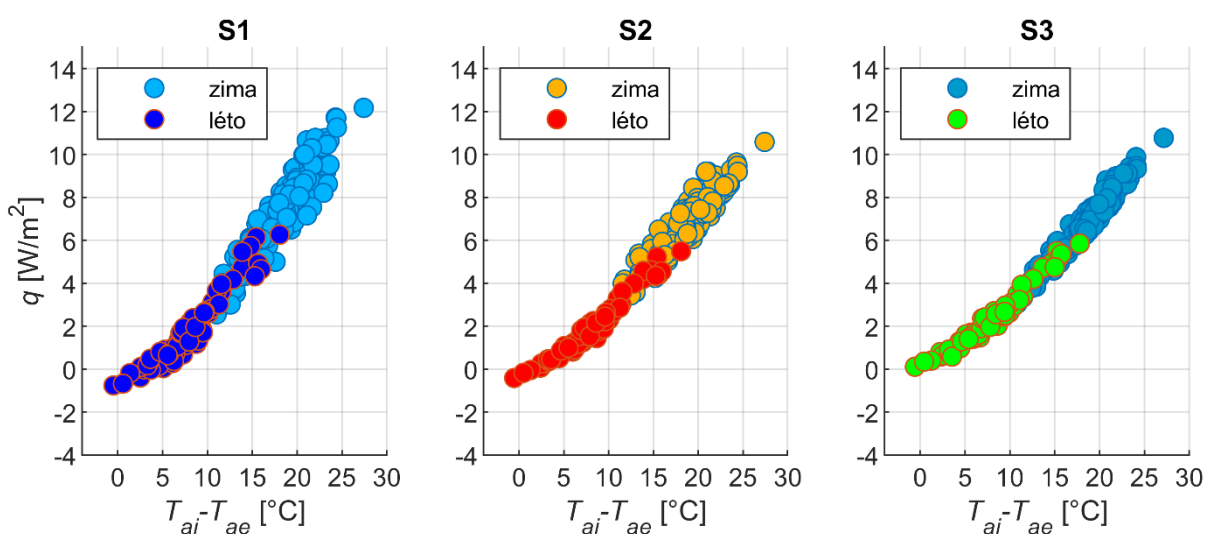
	S1	S2	S3a
b0 (y-start)	-2,245	-1,423	-0,913
b1 (U)	0,526	0,436	0,418
R <sup>2</sup>	96,55%	97,30%	98,46%

Tabulka 16 – Výsledky regrese, celý soubor, interval 24 hodin

Podle rovnice 18 by výsledky koeficientu  $b_0$  měly vycházet nulové, jelikož z hlediska fyziky by měl v případě nulového rozdílu teplot být i samotný tepelný tok nulový.

Taktéž je vidět, že hodnoty součinitele prostupu tepla jsou odstupňované podle tepelně izolačních schopností jednotlivých variant fasád. Fasáda S2 vychází při srovnání lépe než fasáda S1, a to díky větrané dutině, která je schopná lépe izolovat vnitřní stěnu od denních výkyvů teplot. Také samotná vrstva vzduchu v dutině, ač větrané, má určitou izolační schopnost. Stejně tak je vidět rozdíl mezi fasádou S3 a S2, vertikální zahrada má pozitivní vliv na izolační schopnost obálky.

Jak je vidět na grafu 46, v naměřených hodnotách je možné najít nelinearitu s měnící se  $\Delta T$ , tedy že shluky naměřených dat nevytváří přímku, ale spíše křivku. Proto byla data zanalyzována nejen podle typu fasády, ale i podle časového rámce, kdy byla naměřena. Kompletní soubory byly rozděleny na dvě části, a to na hodnoty od začátku června do konce října (66 kompletních měření) a od začátku listopadu do posledního února (152 kompletních měření). První zmiňovaný soubor je menší z důvodu prvotních výpadků jednotlivých datakerů, nicméně pro regresní analýzu je tento počet měření dostatečný.



Graf 47 – Rozložení měřených dat v jednotlivých variantách fasády, interval 24 hodin

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Graf 47, znázorňující jednotlivá zimní a letní období, ukazuje, že hodnoty v letním období jsou logicky blíže nulovému rozdílu teplot. To, co je ale zajímavější, je očividná nestejnost mezi závislostmi v zimním a letním období. Tyto rozdělené soubory byly opět zpracovány regresní metodou. Výsledky viz tabulka 17:

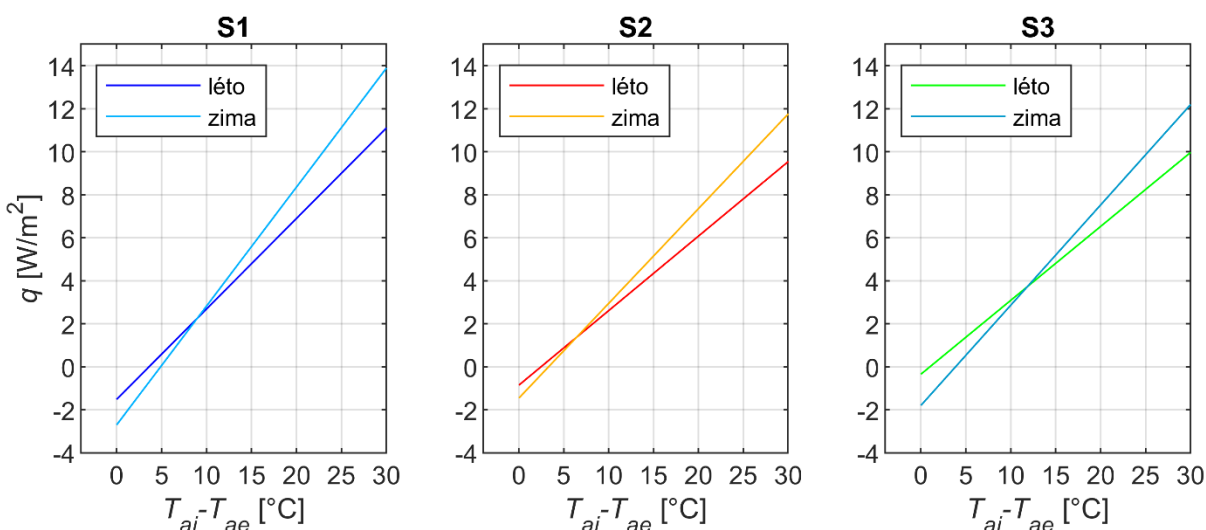
		S1	S2	S3a
léto	b0 (y-start)	-1,512	-0,849	-0,342
	b1 (U)	0,421	0,346	0,344
	R <sup>2</sup>	<b>94,85%</b>	<b>97,49%</b>	<b>97,83%</b>
zima	b0 (y-start)	-2,696	-1,451	-1,794
	b1 (U)	0,553	0,440	0,466
	R <sup>2</sup>	<b>86,65%</b>	<b>88,21%</b>	<b>95,94%</b>

Tabulka 17 – Výsledky regrese s časovým rozdělením, interval 24 hodin

Nejprve je dobré zmínit, že soubory S1 a S2 mají v zimním období větší odchylky od regresní přímky. To se projevuje nižším koeficientem determinace. Regrese letních hodnot, tedy souboru s menším počtem kompletních dat, je možná překvapivě lepší než větší zimní soubor. Nicméně všechny regrese byly uznány za dostatečně validní.

Výsledné hodnoty potvrzují rozdílnost mezi parametrem součinitele prostupu tepla zjištěným v letních a zimních datech. Přesněji, že parametr součinitele prostupu tepla je u zimních měření vyšší, konstrukce se tedy zdá být z hlediska tepelné techniky horší.

Regresní přímky byly znázorněny graficky, viz graf 48.



Graf 48 – Regrese závislosti prostupu tepla na rozdílu teplot, interval 24 hodin

## 4.2.4.2 Součinitel prostupu tepla při uvažování prvních 6 hodin každého dne

Do výsledků se projevil vliv neznámých faktorů, které ovlivňují parametr, který by měl být během roku stálý. Následným krokem byla snaha odfiltrout vliv solárního záření na fasádu. Místo exteriérové teploty byla použita teplota ekvivalentní, která by započítala vliv solárních zisků. Výsledky regresí byly nicméně velmi nízké ( $R^2$  pod 80 %).

Bylo proto upuštěno od celodenního průměru teplot a prostupů tepla. Místo toho byl zpracován průměr hodnot z nočních hodin, tedy od 00:00 do 06:00. Toto opatření by mělo odfiltrout vliv ozáření na prostup tepla. Výsledná lineární regrese tohoto souboru přinesla tyto výsledky:

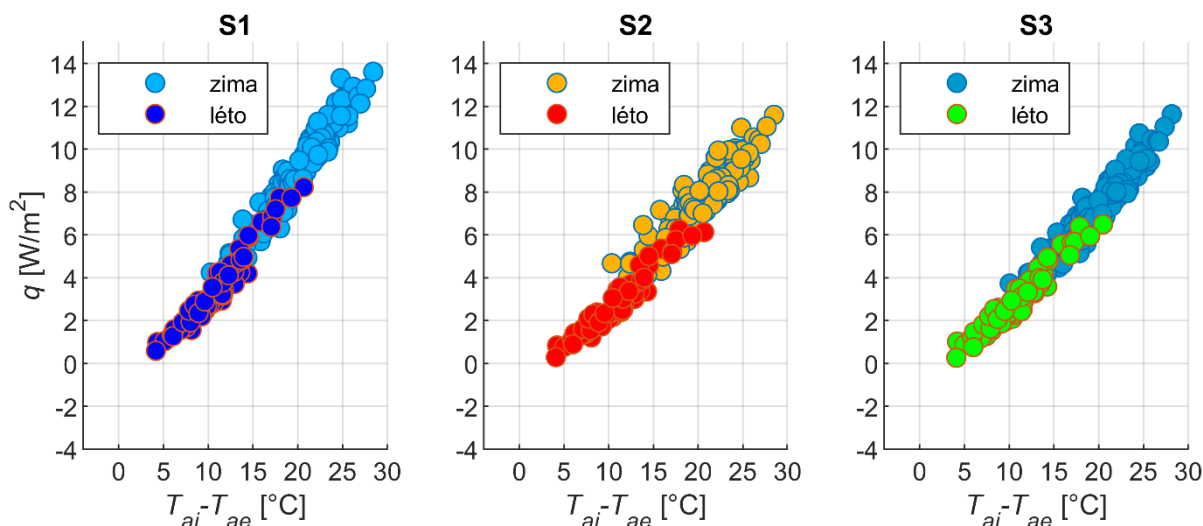
	interval 6 hodin			interval 24 hodin		
	S1	S2	S3a	S1	S2	S3a
<b>b0 (y-start)</b>	-2,63067	-2,034	-1,940	-2,245	-1,423	-0,913
<b>b1 (U)</b>	0,576977	0,469	0,462	0,526	0,436	0,418
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>97,91%</b>	<b>95,80%</b>	<b>97,37%</b>	96,55%	97,30%	98,46%

Tabulka 18 – Výsledky regrese, celý soubor, interval 6 hodin (a porovnání 24 hodin)

Koeficient determinace se u nových souboru dat mírně snížil, nicméně výsledky jsou pořád v tomto ohledu velmi dobré. Problémem by mohl být vyšší parametr  $b_0$ , který by se měl co nejvíce blížit nule. Zároveň byla zjištěna zajímavá změna u parametru  $b_1$ , který se oproti původním souborům, využívající i denní hodnoty, zvýšil. To by mohlo být způsobeno odebráním denních teplot v zimních měsících, kdy sluneční paprsky vyhřály fasádu a snížily tepelný tok, ale teplota exteriéru zůstala nízká. To v původním souboru klopilo přímkou směrem dolů.

Taktéž byly opět zanalyzovány soubory v čase, opět byly vytvořeny stejné podsoubory pro letní a zimní hodnoty, viz graf 49.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla



Graf 49 – Rozložení měřených dat v jednotlivých variantách fasády, interval 6 hodin

Už na první pohled je vidět, že zakřivení hodnot, které bylo možno pozorovat v grafu 47, už není tak výrazné. Tyto podsoubory byly taktéž regresně zpracovány, obdobně jako v předchozích případech, výsledky viz tabulka 19.

		interval 6 hodin			interval 24 hodin		
		S1	S2	S3a	S1	S2	S3a
léto	b0 (y-start)	-1,83571	-1,328	-1,296	-1,512	-0,849	-0,342
	b1 (U)	0,48858	0,381	0,391	0,421	0,346	0,344
	R <sup>2</sup>	<b>96,31%</b>	<b>95,24%</b>	<b>95,52%</b>	<b>94,85%</b>	<b>97,49%</b>	<b>97,83%</b>
zima	b0 (y-start)	-2,25478	-1,069	-1,706	-2,696	-1,451	-1,794
	b1 (U)	0,561809	0,427	0,453	0,553	0,440	0,466
	R <sup>2</sup>	<b>93,99%</b>	<b>85,85%</b>	<b>92,17%</b>	<b>86,65%</b>	<b>88,21%</b>	<b>95,94%</b>

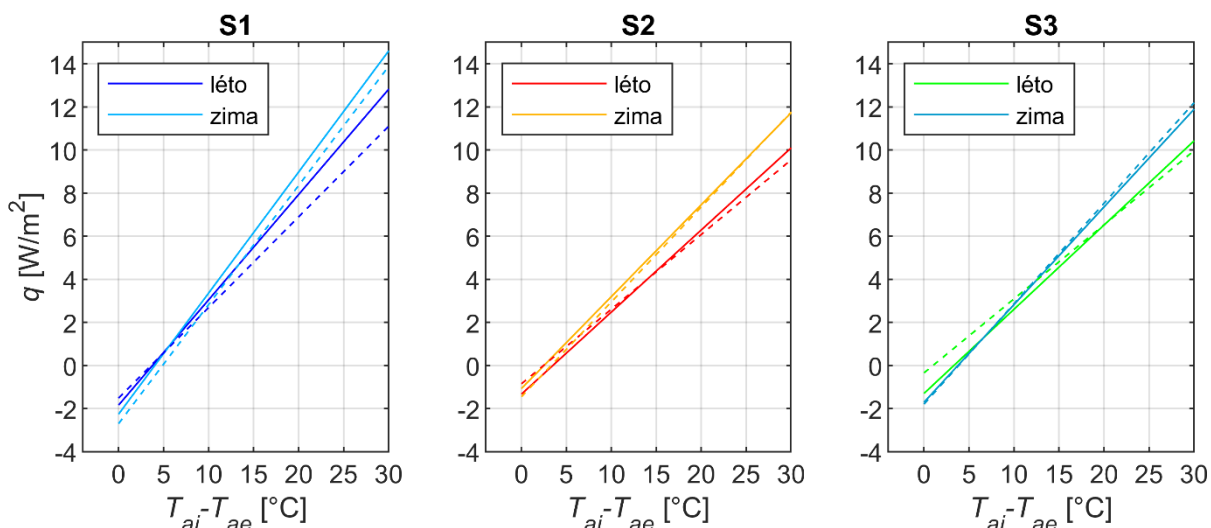
Tabulka 19 – Výsledky regrese s časovým rozdělením, interval 6 hodin (a porovnání 24 hodin)

Z hlediska statistiky se výrazně zlepšil soubor S1 v zimním a mírně i v letním období. Regrese u fasád s větranou dutinou (S2 a S3) se mírně zhoršily v obou obdobích. To odpovídá i výsledkům regrese celého souboru z tabulky 18.

Z hlediska porovnání jednotlivých skladeb, fasáda S1 má stále nejhorší vlastnosti z hlediska prostupu tepla. Zajímavé je, že fasáda S2 nyní vychází v obou časových obdobích lépe než fasáda S3. Ve výsledných hodnotách přes celé sledované období (tab. 18) vychází obě fasády v zásadě shodně.

Nicméně samotné omezení analyzovaných denních hodin neeliminuje změny součinitele prostupu tepla v čase. Jak lze vidět na výsledcích a na grafu 50, regresí získané křivky jsou stále rozdílné.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

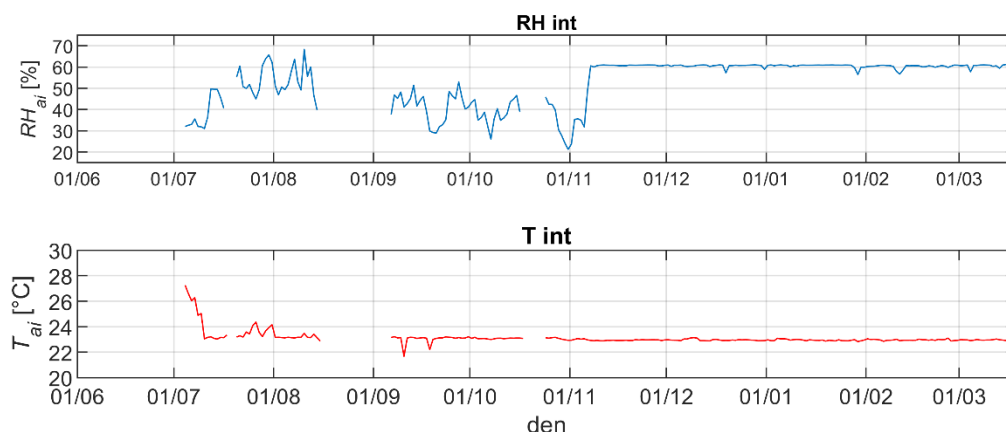


Graf 50 – Regrese závislosti prostupu tepla na rozdílu teplot, interval 6 hodin (a porovnání 24 hodin, čárkovaně)

#### 4.2.4.3 Hypotézy vysvětlující změnu součinitele prostupu tepla v čase

S přechodem na noční šestihodinový interval vyhodnocovaných dat byl odfiltrován vliv solárních zisků. Samotná konstrukce by se taktéž dala považovat za lehkou, její schopnost akumulace je tedy malá, vliv denních solárních zisků by tedy neměly hrát roli.

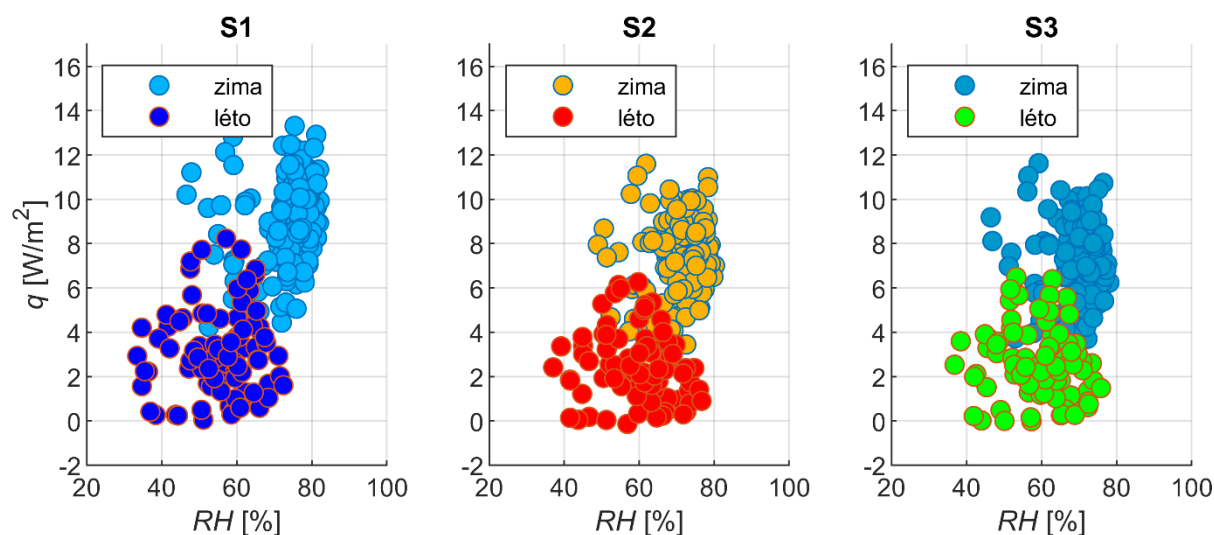
Druhou zvažovanou veličinou, která má potenciál tuto rozdílnost v čase způsobit, by mohla být změna vlhkosti v konstrukci v průběhu roku. Bylo zjištěno, že na začátku listopadu, tedy v období předělu mezi jednotlivými časovými úseky, se ve vnitřním prostředí pravděpodobně z důvodu jiného experimentu začal uměle zvlhčovat vzduch na hladinu relativní vlhkosti 60 %, při stejné teplotě 23 °C. Viz graf 51.



Graf 51 – Vnitřní okrajové podmínky v čase

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

Toto, společně s nižší teplotou v exteriéru, zvedá relativní vlhkost v samotné vnitřní stěně, viz graf 52. Jedná se o průměrně hodnoty ze dvou senzorů měřících relativní vlhkost ve stěně, jeden u vnitřní, druhý u vnější hrany.



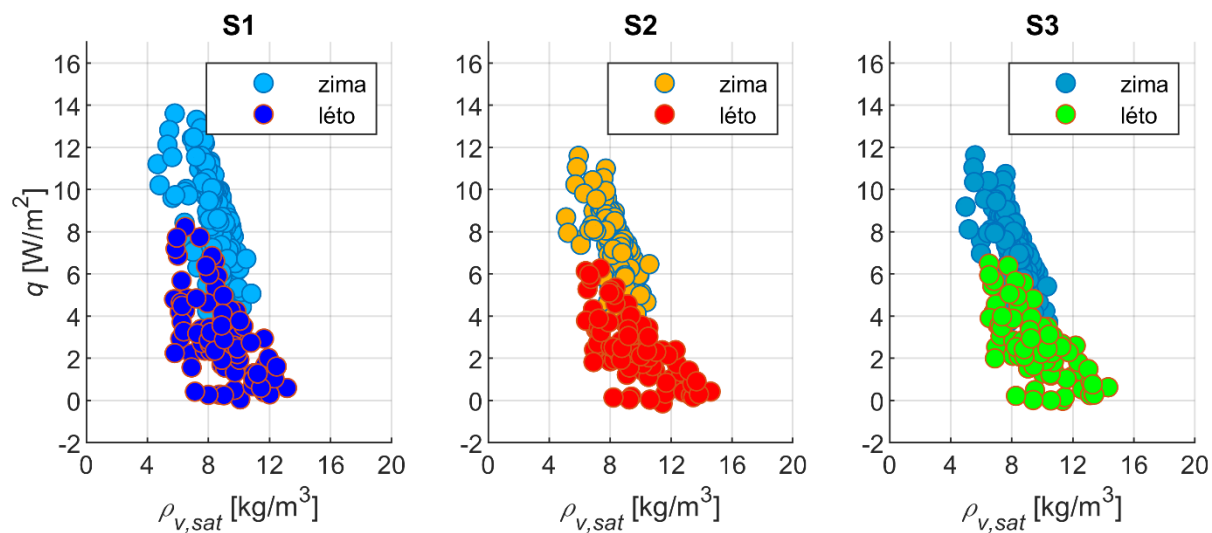
Graf 52 – Závislost relativní vlhkosti a tepelného toku ve vnitřní stěně, interval 6 hodin

Zvýšená relativní vlhkost v zimních měsících však neznamená, že je v okolí materiálu více vody, jež by zvyšovala součinitel tepelné vodivosti. Je proto třeba spočítat koncentraci vodní páry v konstrukci. Pro tento účel byl využit vzorec (20), který vychází ze vzorce pro výpočet plně nasycené koncentrace vodní páry (7), jen je vynásoben relativní vlhkostí v konstrukci.

$$\rho_{v,sat} = \frac{a \left( b \frac{T}{100} \right)^n}{R_v (T + 273,15)} * RH \quad [\text{kg/m}^3] \quad (20)$$

Pro teplotu v konstrukci jsou využity stejné senzory jako pro relativní vlhkost, taktéž zprůměrované. Na výsledcích (graf 53) je vidět, že koncentrace v jednotlivých obdobích je v obou časových úsecích stejná, ne-li vyšší v období letním. To znamená, že průměrně bylo v konstrukci více vody v plynném stavu v létě než v zimě. To je nicméně v rozporu s původním předpokladem. Aby bylo možno vlhkost považovat za faktor zvyšující součinitel prostupu tepla v zimních měsících, musela by být vlhkost v těchto měsících taktéž výrazně vyšší.

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla



Graf 53 – Závislost koncentrace vodní páry a tepelného toku ve vnitřní stěně, interval 6 hodin



## 4.3 Shrnutí kapitoly

První část kapitoly se zabírala dvěma fasádami s plechovou exteriérovou vrstvou, tedy fasádami S1 a S2. Bylo zjištěno, že větraná dutina, jenž je u fasády S2, výrazně napomáhá odvodu tepelných zisků od slunečního záření a snižuje tak tepelné zatížení vnitřní stěny. Naopak v zimních měsících je přímý kontakt plechu a vnitřní stěny u fasády S1 co se týče přenosu solárních zisků výhodný.

Druhá část porovnávala fasády s větranou dutinou, tedy fasády S2 a S3. Bylo zjištěno, že fasáda S3 je schopna snížit teplotu v dutině pod teplotu venkovního vzduchu, a to o několik stupňů Celsia. Fasáda S2 ve stejných podmínkách zaznamenala nárůst teploty v dutině až o 14 °C.

Byla taktéž provedena analýza pohybu vzduchu v dutině u fasád S3. Interpretace výsledků se ukázala jako poměrně problematická, jelikož jednotlivá zjištění si vzájemně odporovala. Jak bylo napsáno výše, teplota ve středu dutiny je v teplých dnech pod teplotou exteriéru, což by naznačovalo ochlazování a tedy pohyb vzduchu v dutině směrem dolů. Nicméně teplotní čidla u spodního otvoru vykazovala vyšší hodnoty než teploty nahoře, což pohyb tímto směrem vylučuje.

Třetí část se zabývala dopadem rozdílů v testovaných skladbách konstrukce na vnitřní prostředí. Nejdříve byly prezentovány teploty v blízkosti vnitřního povrchu fasády, které ukázaly, že se jednotlivé teplotní a solární výkyvy propisují do hodnot teplot naměřených senzory zde umístěnými. Fasáda S1 opět vychází jako nejvíce náchylná na tyto výkyvy, fasáda S3 se ukazuje jako nejstabilnější. Rozdíly mezi těmito fasádami jsou ale poměrně malé, a to díky tepelné izolaci umístěné ve vnitřní stěně, která případné kvalitativní rozdíly exteriérových skladebných variant snižuje.

Byly taktéž analyzovány naměřené tepelné toky a spočítány denní prostupy tepla skrz jednotlivé konstrukce. Při porovnání jsou rozdíly mezi jednotlivými variantami jasně prokazatelné. Hlavně v letních extrémních hodnotách je vidět, že prostup tepla u fasády S3 je oproti teplotám fasády S1 poloviční. Fasáda S2 dosahovala hodnot hustoty tepelného toku mezi fasádou S3 a S1.

Při přepočtu na absolutní čísla není ale rozdíl nikterak zásadní. Pro budovu, která má plochu fasády 1000 m<sup>2</sup> (hala např. 30x32,5x8 m) by byl celkový rozdíl prostupu tepla celou fasádou přibližně 25 kWh za den (z grafu 44, 25Wh/(m<sup>2</sup>\*den)\*1000 m<sup>2</sup> = 25000 Wh/den),

#### 4 Porovnání fasádních variant z hlediska prostupu tepla

což je pro tak velkou budovu zanedbatelný energetický či finanční rozdíl. Taktéž by se daly přepočítat špičkové hodnoty ozáření z odpoledních hodin na množství prosklených otvorů ve střeše budovy. Při maximálním rozdílu  $3 \text{ W/m}^2$  je tento rozdíl na hypotetické fasádě  $3000 \text{ W}$ , což odpovídá přibližně 6 střešním oknům o rozměrech  $1 \times 1 \text{ m}$ .

Závěrečná část této kapitoly se soustředila na zjištění součinitele prostupu tepla na základě měřených údajů. Tato hodnota se ukázala být velmi těžko extrahovatelná z naměřených dat. Nejdříve bylo zjištěno, že součinitele jsou pro jednotlivé fasády rozdílné, což odpovídá i rozdílným prostupům tepla. Nejlépe opět vychází fasáda S3 ( $0,42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), nejhůře S1 ( $0,53 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Fasáda S2 byla opět mezi se součinitelem prostupu tepla  $0,44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

Bylo zjištěno, že tento součinitel není v čase stejný, respektive v zimních měsících je přibližně o jednu pětinu vyšší než v létě. Byla provedena úprava vstupních dat, která by měla odfiltrout vliv slunečního záření, nicméně problém neodstranila. Byla provedena analýza vlhkosti v konstrukci, která by mohla taktéž ovlivnit výsledné hodnoty zkoumaného součinitele. Zjištění této analýzy ale vliv vlhkosti vyloučila. Tuto anomálii se nepovedlo přesvědčivě vysvětlit.

Na závěr je nutné dodat, že se koeficienty vypočtené lineární regresí teoreticky vypočítanému součiniteli jednotlivých variant (viz tabulka 3 v kapitole 2) přibližují hlavně v letním období při 24hodinovém kroku (tabulka 17), kdy jsou hodnoty získané lineární regresí nižší než v měsících zimních.

## 5 Zjednodušený model pro teplotu vzduchu v dutině

### 5.1 Úvod

V průběhu prvního roku experimentu byl vytvořen komplexní model jednotlivých typů experimentálních fasád, které jsou na UCEEB ČVUT testovány. V modelech fasád S2 a S3 bylo třeba vytvořit model větrané dutiny. Pro fasádu S3 bylo navíc potřeba vytvořit model vertikální zahrady. Tyto modely jsou vystavěny v prostředí Matlab Simulink. Jedná se o modely s větším počtem neznámých parametrů, které musely být do simulace dodány na základě odhadu.

Model proudění vzduchu ve větrané dutině vychází z [22]. Model je založen na rovnosti rozdílů tlakových ztrát:

$$\underbrace{\Delta p_w + \Delta p_b}_{\substack{\text{hnací tlakové síly} \\ \text{vlivem větru a termiky} \\ \boxed{1} \quad \boxed{2}}} = \underbrace{\Delta p_f + \Delta p_l}_{\substack{\text{tlakové ztráty vlivem} \\ \text{tření a místních odporů} \\ \boxed{3} \quad \boxed{4}}} \quad [\text{Pa}] \quad (21)$$

kde se součet rozdílů hnacích tlakových sil, tedy od proudění větru a rozdílu teplot (termický vztlak), musí rovnat rozdílům odporů od vazkého tření (závisí na režimu proudění a relativní drsnosti stěn dutiny) a místních tlakových ztrát od jednotlivých prvků v dutině (konstrukční žebra, vstup a výstup z dutiny). Výsledkem je rychlost větru, který proudí v dutině.

Tepelný model větrané dutiny je poměrně komplikovaně počítán přes výpočet tepla sáláním mezi jednotlivými povrchy a přenos tepla prouděním, pro jehož vyčíslení je nutné správné fungování modelu proudění z rovnice 21.

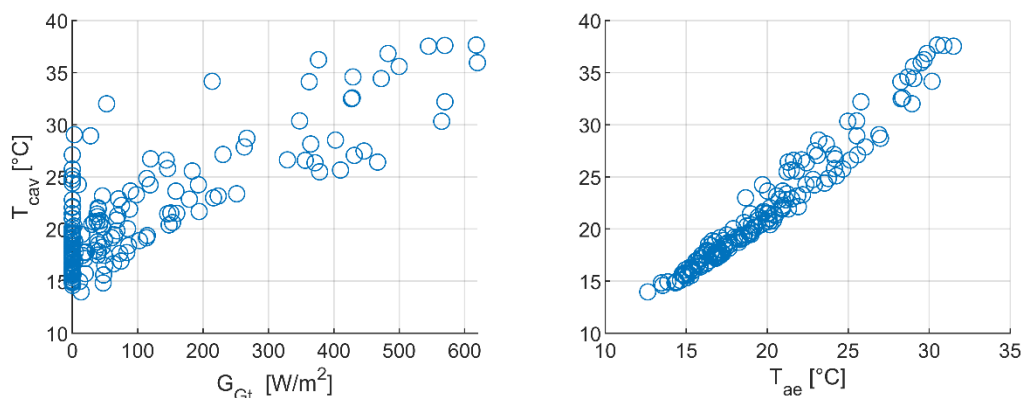
Ačkoliv je matematický model funkční, vznikla z praktických důvodů otázka, zda by fyzikální model nebylo možné nahradit náhradním statistickým modelem. Cílem této kapitoly je prozkoumat možnost vytvoření statistického modelu teploty v dutině a obejít tak komplikované modely přenosových jevů v rámci vegetace a ve větrané dutině.

## 5.2 Regresní model teploty vzduchu v dutině

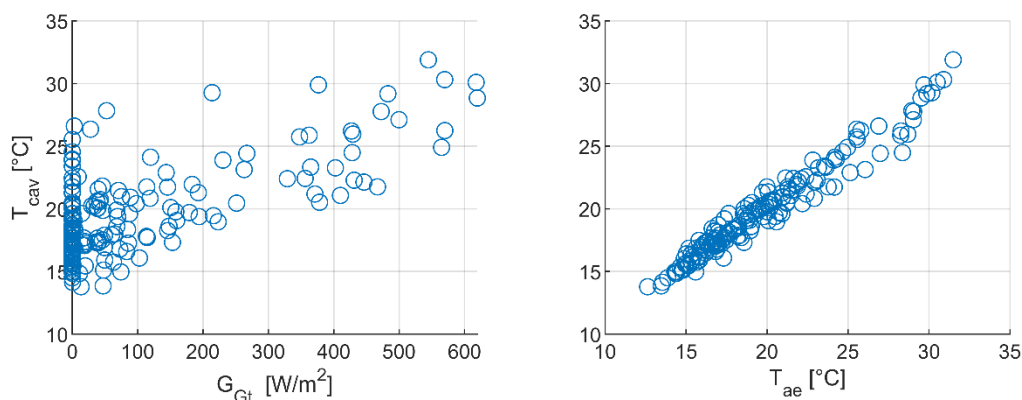
Pro zjednodušený model teploty vzduchu byla využita násobná lineární regrese podle rovnice:

$$T_{cav} = b_0 + b_1 G_{Gt} + b_2 T_e \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (22)$$

kde koeficient  $b_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] posouvá výslednou rovinu o určitý koeficient, tedy například v teplotních průbězích (grafy 57 až 64) zvedá či snižuje posun křivky po celé délce,  $b_1$  [ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2)/\text{W}$ ] ovlivňuje vliv okrajové podmínky svislého ozáření fasády a  $b_2$  [-] ovlivňuje vliv exteriérové teploty na výslednou teplotu v dutině  $T_{cav}$ . Na grafech 54 a 55 je vidět souvztažnost mezi jednotlivými proměnnými během dvou týdnů v srpnu (8. - 14. 8.). Jak vidno, základním vztahem bude korelace mezi teplotou venkovního vzduchu a dutinou, kde je viditelná silná lineární závislost. Množství bodů umístěných při levém okraji levého grafu ukazuje noční data, kdy není naměřeno žádné ozáření fasády. Toto ozáření bude v denních hodinách upravovat (zvyšovat či snižovat) teplotu definovanou základním vztahem mezi teplotou v exteriéru a teplotou v dutině.



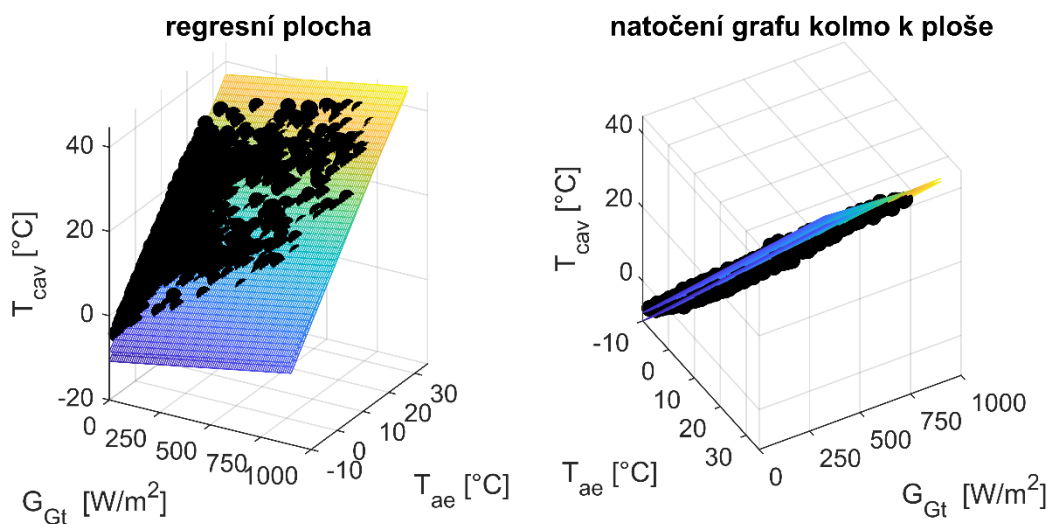
Graf 54 – Korelace výsledné proměnné  $T_{cav}$  na jednotlivých nezávislých proměnných



Graf 55 – Korelace výsledné proměnné  $T_{cav}$  na jednotlivých nezávislých proměnných

## 5 Zjednodušený model pro teplotu vzduchu v dutině

Výsledkem by měla být plocha, která bude procházet třídimenzionálním prostorem co nejlíže mraku naměřených hodnot. Viz graf 56, který vznikl regresí celého souboru změřených dat na fasádě S2.



Graf 56 – Výsledná regresní plocha

## 5.3 Verifikace regresního modelu

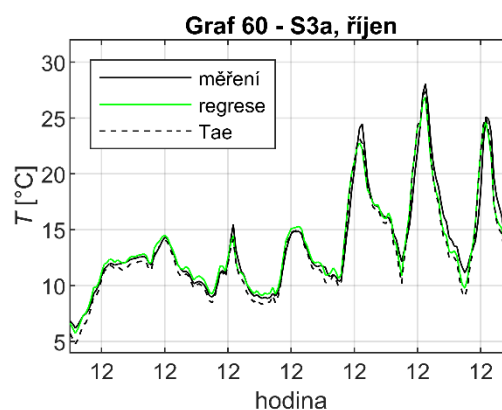
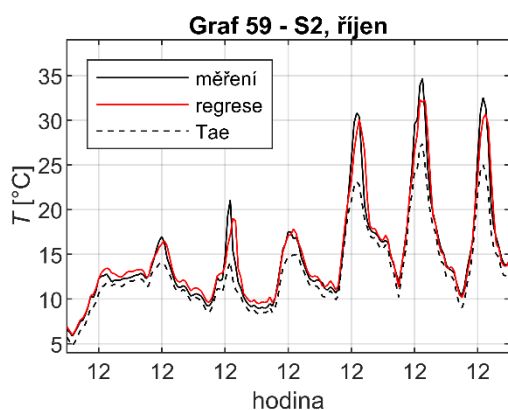
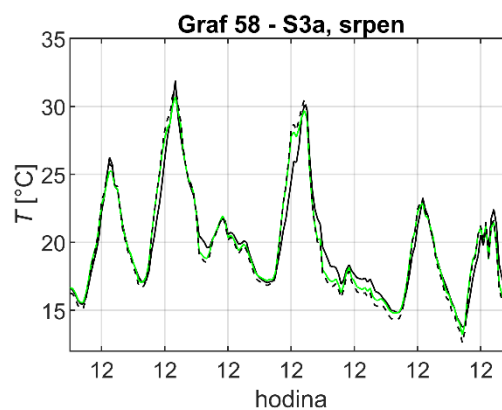
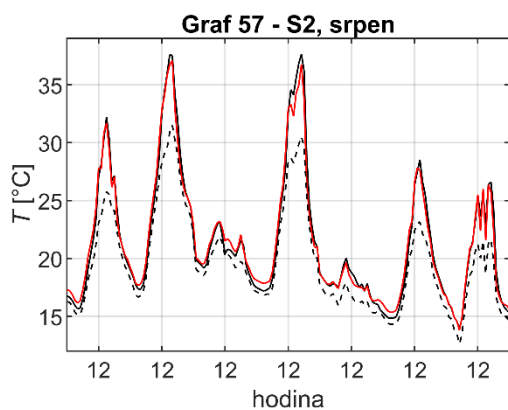
Pro regresní analýzu byl použit kompletní hodinový soubor, tedy 5294 měření. Pro obě dvě zkoumané varianty větraných dutin (S2 a S3a) byly spočítány regresní parametry. Výsledky níže.

	S2	S3a
$b_0$ ( $T_{cav}$ posun)	1,2752	1,2013
$b_1$ ( $G_{Gt}$ )	0,0089	-0,0008
$B_2$ ( $T_{ae}$ )	0,9840	0,9502

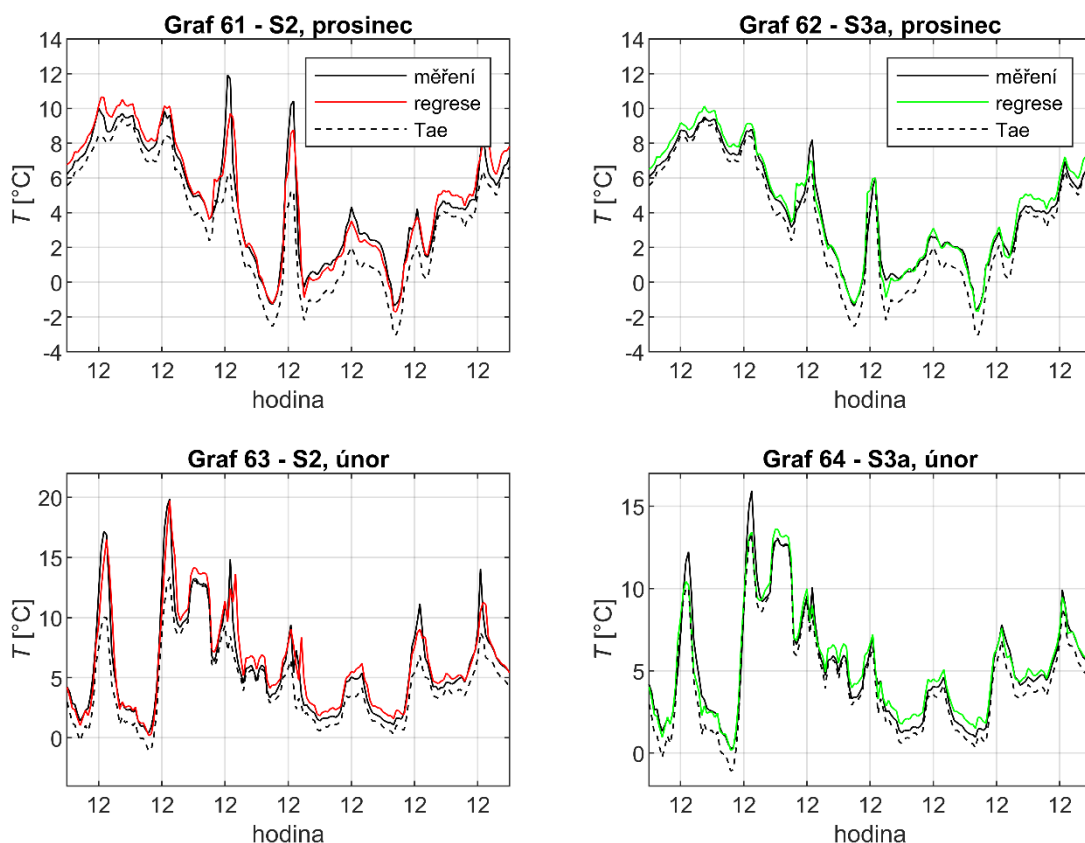
Tabulka 20 – Výsledky regrese celého souboru

Jak je vidět, byla potvrzena hypotéza, že dominantní člen je teplota exteriéru. I při špičkových hodnotách ozáření (cca 800 W) bývají teploty maximálně 40x nižší (cca 20 °C), nicméně rozdíl u koeficientů je přibližně o tři řády vyšší ve prospěch exteriérové teploty. Taktéž je zajímavé, že koeficient pracující s ozářením na fasádě S3a vyšel záporně, tedy platí, že když na fasádu dopadá slunce, teplota v dutině se bude o součin tohoto koeficientu a ozáření snižovat.

Jak je vidět níže, výsledky regrese a měření si odpovídají. Jedná se vždy o 8. až 14. den v měsíci.



## 5 Zjednodušený model pro teplotu vzduchu v dutině



Grafy 57 až 64 – Porovnání regresí a měřených hodnot v průběhu roku

Následně byl každý 8. až 14. den vyhodnocen z hlediska statistické přesnosti, výsledky koeficientů determinace viz tabulka 21.

	S2	S3a
červenec	97,19%	93,38%
srpen - regresní	96,76%	94,39%
září	96,76%	91,60%
říjen	95,47%	95,17%
listopad	96,58%	96,98%
prosinec	94,63%	97,06%
leden	96,41%	98,09%
únor	92,03%	96,30%
<b>CELÝ SOUBOR</b>	<b>99,11%</b>	<b>99,30%</b>

Tabulka 21 – Výsledky koeficientů determinace ( $R^2$ ) pro jednotlivá období

Je vidět, že regresí vypočtené hodnoty jsou aplikovatelné skrz celý soubor, tedy že jeden model je schopen s dostatečnou přesností odhadnout teplotu v jakoukoli roční dobu. Hodnoty  $R^2$  v žádném zkoumaném období neklesly pod 90 %.

## 5 Zjednodušený model pro teplotu vzduchu v dutině

V případě potřeby větší přesnosti je zde možnost vypočítat hodnoty koeficientů pro jednotlivé měsíce. Byly zjištěny parametry rovnic založené na měřených datech ze srpna a prosince. Viz tabulka 22.

	Srpnová regrese		Prosincová regrese	
	S2	S3a	S2	S3a
$b_0$ ( $T_{cav}$ posun)	-0,2191	2,4286	1,4013	1,1629
$b_1$ ( $G_{Gt}$ )	0,0086	-0,0011	0,0109	0,0003
$B_2$ ( $T_{ae}$ )	1,0590	0,8890	0,8799	0,8827

Tabulka 22 – Výsledky regrese pro srpnové a prosincové naměřené hodnoty

Je zajímavé, že hodnoty  $b_1$  jsou u fasád velmi závislé na ročním období. V letním měsíci srpnu se jeho negativní hodnota zvýšila oproti regresi pracující s celým souborem dat (tabulka 20) a naopak v zimním měsíci prosinci je tento koeficient kladný. To by mohlo napovídat, že se v koeficientu odráží vegetační cyklus vertikální zahrady.

Schopnost rovnice (16) s hodnotami z tabulky 22 předpovědět teplotu v dutině v průběhu roku znázorňuje tabulka 23. Ta zobrazuje hodnoty koeficientu determinace. Na těchto hodnotách je vidět, že z hlediska statistiky jsou tyto regrese v porovnání s regresí celého souboru (tabulka 21) blíže reálným hodnotám v období, pro které byla regrese prováděna. Naopak její přesnost s měnícím se ročním obdobím klesá.

	Srpnová regrese		Prosincová regrese	
	S2	S3a	S2	S3a
červenec	96,62%	94,70%	87,53%	82,49%
srpen	<b>97,50%</b>	<b>94,85%</b>	88,13%	84,58%
září	96,23%	91,71%	87,51%	81,07%
říjen	95,62%	93,34%	90,86%	90,69%
listopad	82,83%	86,51%	94,57%	96,33%
prosinec	83,40%	80,30%	<b>95,28%</b>	<b>98,64%</b>
leden	80,05%	76,60%	96,01%	98,23%
únor	85,61%	83,02%	90,47%	96,72%

Tabulka 23 – Výsledky koeficientů determinace ( $R^2$ ) pro srpnovou a prosincovou regresí



## 5.4 Shrnutí kapitoly

Pátá kapitola této práce se zabírala regresním modelem teploty vzduchu v dutině. Výhodou takového modelu je možnost obejít nutnost komplexních fyzikálních výpočtů, které jsou nutné pro simulaci vertikální zahrady a hlavně větrané dutiny.

Výsledky regresního modelu jsou velmi dobré, koeficient determinace je pro celé soubory obou fasád (S2 a S3) přes 99 procent. Zároveň jsou výsledné koeficienty pravděpodobně použitelné pro celý rok, nejsou tedy závislé na sezónních rozdílech v počasí. V případě nutnosti přesnějšího výpočtu je možnost regresní metodou získat rovnice teploty v dutině pro každý jednotlivý měsíc. Tyto rovnice budou přesnější než ty, získané regresí celého datového souboru, nejsou ale využitelné pro simulaci teploty v dutině po celý rok.

Díky zvoleným veličinám bude také pravděpodobně možné využít zjištěné rovnice pro fasádu orientovanou jinak, než je ta experimentální. Se znalostí množství solárního záření dopadajícího na fasádu, které se dá spočítat (viz kapitola 3.4) a exteriérové teploty, která je v okolí zkoumané budovy, by mohlo být možné vypočítat teplotu v dutině například i pro jižní či východní fasádu. Nicméně pro validaci takového tvrzení by bylo třeba mít měřená data právě z těchto fasád.

Nicméně je třeba také popsat nevýhody vytvořeného modelu. Ten pracuje s přesně danou geometrií fasády, tedy tloušťkou větrané dutiny, prouděním vzduchu a výškou větrané dutiny. Tyto pevně dané proměnné jsou z hlediska výsledné teploty v dutině velmi důležité, je tedy otázkou, jak moc se bude měnit teplota v dutině, kdyby samotná fasáda nebyla tři metry vysoká, ale například deset. S těmito úpravami právě vypracovaný model nepracuje, je pevně zafixován na experimentální fasádu na UCEEB ČVUT.

## 6 Závěr

### 6.1 Shrnutí zjištěných poznatků

Cílem práce bylo v první řadě analyzovat naměřená data z experimentálních vzorků halových fasád, které byly postavené na UCEEB ČVUT. Tyto vzorky obsahovaly 3 varianty fasád, od jednoplášťové, přes dvouplášťovou až po variantu s instalovanou vertikální zahradou. Druhým cílem byla snaha zjištěné poznatky aplikovat při vývoji praktických modelů, které by měly predikovat chování těchto fasád, ať už z hlediska tepelně-technického, tak z hlediska potřeby nutné závlahové vody, kterou vertikální zahrada ke svému přežití potřebuje.

A právě první část této práce se zabírala možností, jak optimalizovat množství nutné závlahy. Cílem je do fasády dovést minimální množství vody, které zajistí, aby vertikální zahrada prosperovala. Bylo nutné nejprve zpracovat naměřená data, ze kterých bylo možno vyextrahovat data o evapotranspiraci vegetace a substrátu. Z těchto dat byl vytvořen regresní model, který dokázal evapotranspiraci spojit s okrajovými podmínkami, které na fasádu působí. Tato znalost vztahu mezi okolním počasím a množstvím vody, které evapotranspirace vyžaduje, poskytla možnost vytvořit sérii na sebe navazujících modelů, které dokážou s průměrnou chybou 0,5 litru určit budoucí denní dávku nutné závlahy na metr čtvereční vertikální zahrady. Tento model pracuje se vstupními hodnotami, které se dají získat z běžné denní předpovědi počasí. Jako vedlejší produkt podmínky dosažitelnosti vstupních dat byl vytvořen upravený Britow-Campbell model, který dokáže spočítat denní dávku ozáření libovolně natočené fasády s průměrnou absolutní chybou v letních měsících 25 %, a to ze znalosti maximální a minimální denní teploty.

Druhá část práce analyzovala rozdíly mezi jednotlivými vzorky halových fasád z hlediska prostupu tepla. Bylo potvrzeno, že oplechovaná fasáda s větranou dutinou má lepší tepelně technické vlastnosti než fasáda, která má trapézový plech na vnitřní stěně umístěný kontaktně. Taktéž bylo zjištěno, že vertikální zahrada ochlazuje v letních dnech vzduch ve větrané dutině pod hodnotu teploty vzduchu v exteriéru, což má pozitivní vliv na vnitřní stěnu a samotné vnitřní prostředí budovy. Dopad je nicméně závislý na tloušťce tepelné izolace ve vnitřní stěně. Pokud je vnitřní stěna navržena tak, aby splnila dnešní tepelně technické požadavky, nejsou energetické provozní rozdíly nikterak zásadní. Závěrem druhé části byla analýza součinitele prostupu tepla jednotlivých fasád, který se

## 6 Závěr

dle naměřených dat měnil v závislosti na ročním období. Byl odfiltrován vliv slunečního záření, vliv vlhkosti byl taktéž vyloučen. Důvod tohoto chování byl na konci zkoumání tedy nadále neznámý.

Třetí a závěrečná část práce se věnovala otázce, zda lze zjednodušit komplexní fyzikální modely přenosu tepla a vlhkosti ve vrstvě zeleně, substrátu a větrané vzduchové dutině. Cílem tohoto zjednodušení bylo vytvořit regresní modely teploty větraného vzduchu v dutině, které by obešly stávající výpočetně neefektivní modely vertikální zahrady a větrané dutiny. Nové regresní modely byly vytvořeny jak pro fasádu s vertikální zahradou, tak pro fasádu s dutinou a exteriérovým trapézovým plechem. Porovnání výsledků zjednodušených modelů s reálně naměřenými hodnotami vyšlo velmi dobře, s koeficientem determinace přesahujícím 90 % pro všechny okrajové podmínky od června do února. V případě potřeby je možno tyto regresní rovnice spočítat pro jednotlivé časové úseky, například s měsíčním krokem, u kterých bylo potvrzeno, že jsou přesnější než model celoroční.

## 6.2 Zhodnocení práce a možné budoucí výzvy

Tato práce otevřela několik nových otázek. Jednou z nich je právě otázka vodní bilance vertikálních zahrad. Jeden ze zásadních problémů, který je třeba vzhledem k současným globálním změnám vyřešit, je hospodaření s vodou. Optimalizace závlahy je, stejně jako využívání recyklované šedé vody, jedna z cest, která by mohla snížit spotřebu tohoto v poslední době čím dál tím nedostatkovějšího zdroje. Je otázkou, zda zrovna v této práci navržený prediktivní model závlahy je tou správnou cestou. Model nicméně naznačuje, že není třeba mít fasády pracně monitorované, aby nedocházelo k nadměrnému prolévání fasády, či naopak jejímu sesychání. Prediktivní model by ale bylo potřeba dále vylepšovat, a to hlavně reálným testováním, které by poskytlo další data a potvrdilo či vyvrátilo jeho pozitivní vliv na spotřebu vody a zdraví samotné fasády.

Při pohledu na výsledky této práce je taktéž možné dojít k závěru, že aplikace vertikálních zahrad na halové objekty je z hlediska energetických, potažmo ekonomických benefitů minimálně sporná. I nejjednodušší varianta fasády, s plechem umístěným přímo v kontaktu s vnitřní stěnou, dosahovala v absolutních číslech prostupu tepla velmi podobných výsledků, jako montážně a provozně nepochybně dražší varianta osazená vertikální zahradou. Z hlediska prostupu tepla je dobře provedená vnitřní stěna podstatně důležitější než jakákoliv na UCEEB zkoušená varianta exteriérového řešení. Je ale otázkou, nakolik by vertikální zahrada změnila podmínky v dříve postavené či hůře provedené halové stavbě, která by neměla tak dobré tepelné technické vlastnosti.

Bylo by vhodné experiment zaměřit na vliv vertikálních zahrad a obecně zelených fasád na teplotu v exteriéru. Měřené údaje ukázaly, že zelená fasáda je schopna kompenzovat nezanedbatelný podíl dopadajícího solárního záření přeměnou na vodní páru. Kvantifikovat vliv zeleně na teplotu okolního prostředí by mohlo napomoci řešení čím dál tím většího problému městských tepelných ostrovů.

Taktéž by mohlo být zajímavé hlouběji prostudovat nesrovnalost, která byla nalezena při analýze součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí. Tento součinitel zdá se není v čase konstantní, mění se naopak podle ročního období. Tento trend nebyl v této práci přesvědčivě vysvětlen.

Závěrem by se rád autor vyjádřil k jednoduchým regresním statistickým modelům, predikujícím teplotu vzduchu v dutině. Výsledky těchto modelů byly vzhledem

## 6 Závěr

k jednoduchosti výpočtu velmi dobré. Je ale třeba brát taktéž v potaz omezení, která tento model má. Navržený model pracuje s daty, která poskytla měření několika málo typů fasád s přesně danou geometrií dutiny. Jeho hlavním problémem je nedostatečná univerzálnost, díky které by patrně zatím neměl využití v běžné praxi. Proto se nabízí otázka, jakým způsobem by bylo možné model přepracovat na univerzální model výpočtu teploty ve větrané dutině. V principu není reálné, aby experiment dodal data o chování několika desítek variant fasád s proměnnou geometrií a orientací. Data by naopak mohl poskytnout nějaký pokročilý výpočetní model, tedy například takový, který byl společně s experimentem vyvinut.

## 7 Citovaná literatura

[1]. KÖHLER, Manfred. Green facades - A view back and some visions. *Urban Ecosystems*. Neubrandenburg, Německo : Springer US, 2008. DOI: 10.1007/s11252-008-0063-x.

[2]. PŘEROVSKÁ, Zuzana. Vertikální zahrady v interiéru a exteriéru - Diplomová práce. *Mendelova univerzita v Brně*. [Online] 2013. [Citace: 19. 5. 2020.] [https://is.mendelu.cz/zp/portal\\_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti\\_zp=35367;zp=35367;dinfo\\_jazyk=1;lang=cz](https://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti_zp=35367;zp=35367;dinfo_jazyk=1;lang=cz).

[3]. garden-cult data base. *garden historic library of Berlin*. [Online] GTG der Universität der Künste Berlin (UdK). [Citace: 19. 5. 2020.] <http://www.garden-cult.de/>.

[4]. CORBUSIER, Le a CLAUDIUS-PETIT, E. *Vers une architecture*. Paříž : G. Crès, 1924. 0-89236-822-5.

[5]. HINDLE, Richard L. A vertical garden: origins of the Vegetation-Bearing Architectonic Structure and System (1938). *Studies in the History of Gardens & Designed Landscapes*. Philadelphia : University of Pennsylvania, 2012. 32. DOI 10.1080/14601176.2011.653535.

[6]. WHITE, Stanley Hart. US patent 2113523A. *google.com*. [Online] 5. duben 1938. [Citace: 19. 5. 2020.] <https://patents.google.com/patent/US2113523>.

[7]. BLANC, Patrick. documents - Biography. *Vertical Garden Patrick Blanc*. [Online] [Citace: 9. 5. 2020.] <https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/documents>.

[8]. GIACOMELLO, E. a VALAGUSA, M. Vertical greenery. *Evaluating the High-Rise Vegetation of the Bosco Verticale, Milan*. Chicago : ARUP, Council of Tall Buildings and Urban Habitat, 2015. ISBN: 978-0-939493-42-5.

[9]. V Karlíně vyrůstá administrativní budova Butterfly s certifikací BREEAM Excellent. *TZB-info*. [Online] 11.. 5. 2017. [Citace: 19. 5. 2020.] <https://stavba.tzb-info.cz/nizkoenergeticke-stavby/15741-v-karline-vyrusta-administrativni-budova-butterfly-s-certifikaci-breeam-excellent>.

- [10]. **BRANDEJSKÝ, Petr.** První živá hala na světě – LIKO-Vo. *TZB-info*. [Online] 26.. 6. 2019. [Citace: 19. 5. 2020.] <https://stavba.tzb-info.cz/architektura-staveb/19231-prvni-ziva-hala-na-svete-liko-vo>.
- [11]. Živé stavby - zelené střechy a zelené fasády. *Živé stavby*. [Online] LIKO-S, a.s. [Citace: 19. 5. 2020.] <http://www.zelenafasada.cz/produkty>.
- [12]. **PÉREZ, Gabriel, a další.** Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Lleida : Elsevier Ltd., 2014. 38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>.
- [13]. **ELGIZAWY, EBTESAM.** The Effect of Green Facades in Landscape Ecology. *Procedia Environmental Sciences*. Cairo : Elsevier Ltd., 2016. 34. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.012>.
- [14]. **PERINI, Katia a ROSASCO, Paolo.** Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*. Ženeva : Elsevier Ltd., 2013. 70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>.
- [15]. **PERINI, Katia, et al.** Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*. 2011. 46.11. 2287-2294..
- [16]. **AZKORRA, Z., a další.** Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system. *Applied Acoustics*. Španělsko, Čile : Elsevier Ltd., 2015. 89. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>.
- [17]. **WONG, Nyuk Hien, a další.** Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*. Singapur : Elsevier Ltd., 2009. Sv. 2, 45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>.
- [18]. **THOMAZELLI, Rodolfo, CAETANO, Fernando a BERTOLI, Stelamaris.** Acoustic properties of green walls: Absorption and insulation. *Sustainable Materials for Sound Absorption and Insulation: Paper*. Buenos Aires : International Congress on Acoustics, 2016. ICA2016-695.
- [19]. **VAN KLINK, Roel, BOWLER, Diana E., a další.** Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science*. 2020.

## 7 Citovaná literatura

[20]. **KOPECKÝ, Pavel**. Řešené příklady ze stavební fyziky. *Katedra TZB FSv ČVUT*. [Online] 2014. [Citace: 30. Březen 2020.] [http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/124st2b\\_02\\_kopecky.pdf](http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/124st2b_02_kopecky.pdf).

[21]. **ALMOROX, Javier**. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. Madrid : TÜBITAK, 2011. doi:10.3906/fiz-0912-20.

[22]. **STANĚK, Kamil**. Fotovoltaické zdroje pro budovy v podmínkách skutečného provozu, disertační práce. Praha : ČVUT v Praze, vedoucí práce Jan Tywoniak, 2011. KOS-43071908505.

[23]. **PEREZ, R. a INEICHEN, P.** Dynamic Models for hourly global-to-direct irradiance conversion. Colorado, USA : Ashrae Transactions, 1992. 98.1: 354-369.