

# České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



MAGISTERSKÁ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto magisterskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Michala Dohnala, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne: .....

.....

Podpis studenta

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce doc. Ing. Michalu Dohnalovi, Ph.D. za cenné rady a obětavou pomoc při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům a prarodičům za morální a finanční podporu.

Při zpracování diplomové práce bylo využito měření a poznatků získaných v rámci projektů Grantové agentury České republiky 14-10455P a 17-21011S

Odhad evapotranspirace městské zeleně v  
areálu Univerzitního centra energeticky  
efektivních budov ČVUT v Praze

Estimation of evapotranspiration from urban  
green spaces in premises of University Centre  
for Energy Efficient Buildings CTU in Prague

## **Anotace**

Výpar je jednou ze základních součástí hydrologické bilance, jejíž stanovení je důležité pro správné hospodaření s vodními zdroji, zemědělství, lesnictví, energetiku, a také pro pochopení vztahů mezi změnami klimatu a využíváním půdy.

Diplomová práce se zabývá teorií vypařování vody v přírodě, metodami stanovení hodnoty výparu, výpočetními mikrometeorologickými metodami a faktory ovlivňujícími výpar. Alternativně je vypočítána evapotranspirace na třech lokalitách v rámci areálu UCEEB s rozdílným vegetačním krytem (zelená střecha, travnatá plocha, plocha pokrytá zatravnovacími dlaždicemi). Rozdíly v intenzitě evapotranspirace mezi lokalitami jsou diskutovány. Dlouhodobá mikrometeorologická měření jsou doplněna jednorázovou měřicí kampaní na extenzivní zelené střеше budovy UCEEB. Z údajů naměřených při evaporačním experimentu byla vyhodnocena prostorová variabilita výparu z volné hladiny na zelené střеше a přilehlé střеше pokryté betonovou dlažbou. Průběh výparu na základě provedeného experimentu byl porovnán s hodnotami výparu získanými výpočtem z naměřených meteorologických dat. Výsledky provedeného experimentu potvrdily očekávanou prostorovou variabilitu. Variabilita v rozsahu 30% průměrné výšky výparu má nezanedbatelný vliv na hydrologickou bilanci studovaného systému.

**Klíčová slova:** evaporace, evapotranspirace, Penmanova metoda, Penmanova-Monteithova metoda, radiační poměry stanoviště, tok tepla do půdy

## **Abstract**

Evaporation is one of the basic components of the hydrological balance, which determination is important for the proper management of water resources, agriculture, forestry, energy, and also for understanding the relationship between climate change and land use.

The diploma thesis deals with the theory of evaporation of water in nature, methods for determination of evaporation, computational micrometeorological methods and factors influencing the evaporation. Alternatively, evapotranspiration is calculated at three locations within the UCEEB area with a different vegetation cover (green roof, grassy area, permeable pavement). Differences in the intensity of evapotranspiration between localities are discussed. Long-term micrometeorological measurements are complemented by a dedicated measurement campaign on the extensive green roof of the UCEEB building. From the data measured in the evaporative experiment, the spatial variability of the evaporation from the water surface on the green roof and the adjacent roof covered with concrete pavement was evaluated. The course of evaporation determined from the experiment was compared with the values calculated from measured meteorological data. The results of the experiment confirm the expected spatial variability. Variability in the range of 30% of the average evaporation height has a significant effect on the hydrological balance of the studied system.

**Keywords:** evaporation, evapotranspiration, Penman method, Penman-Monteith method, radiation balance of the surface, soil heat flux

# Zadání DP



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební


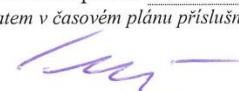
Tháškova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE


### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bc. Urban</u>	Jméno: <u>Lukáš</u>	Osobní číslo: <u>370683</u>
Zadávající katedra: <u>K141</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Odhad evapotranspirace městské zeleně v areálu Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Estimation of evapotranspiration from urban green spaces in premises of University Centre for Energy Efficient Buildings CTU in Prague</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši k problematice vypařování vody v přírodě a teorii vypařování vody. Uveďte a diskutujte alternativní metody výpočtu evapotranspirace z mikrometeorologických měření ke standardní Penmanově-Montheithově rovnici. Použijte data ze tří lokalit v areálu Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT k odhadu evapotranspirace odlišných antropogenních půdních systémů. Na zelené střeše budovy UCEEB posuďte prostorovou variabilitu výparu v případě typického letního dne.	
Seznam doporučené literatury: Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London A(194), S. 120-145.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>doc. Ing. Michal Dohnal, PhD.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>6. 10. 2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>7. 1. 2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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“.</i>	
<u>6.10.2017</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	2
1. Úvod .....	5
2. Teorie vypařování vody v přírodě .....	7
2.1. Evaporace.....	7
2.2. Transpirace.....	10
2.3. Evapotranspirace.....	10
2.4. Potenciální evapotranspirace.....	11
2.5. Aktuální evapotranspirace.....	17
2.6. Referenční evapotranspirace .....	17
2.7. Faktory ovlivňující evapotranspiraci .....	22
3. Metody.....	23
3.1. Popis lokality .....	23
3.2. Popis přístrojového vybavení.....	25
3.3. Popis evaporačního experimentu .....	29
4. Výsledky.....	32
4.1. Vyhodnocení evaporačního experimentu.....	32
4.2. Vyhodnocení evapotranspirace pro den evaporačního experimentu .....	39
4.3. Vyhodnocení evapotranspirace pro vegetační období 2015 a 2016 .....	48
4.4. Stanovení hodnoty toku tepla do půdy a povrchového odporu.....	60
4.4.1. Tok tepla do půdy.....	60
4.4.2. Povrchový odpor .....	62
4.5. Citlivostní analýzy výpočetních metod evapotranspirace.....	66
5. Závěr.....	72
6. Reference .....	73
7. Přílohy .....	76
7.1. Tabulky a grafy .....	76
7.1.1. Vyhodnocení evaporačního experimentu.....	76



## Seznam použitých symbolů

$E$	[mm d <sup>-1</sup> ]	evaporace
$ET$	[mm d <sup>-1</sup> ]	evapotranspirace
$ETa$	[mm d <sup>-1</sup> ]	aktuální evapotranspirace
$ETp$	[mm d <sup>-1</sup> ]	potenciální evapotranspirace
$ETO$	[mm d <sup>-1</sup> ]	referenční evapotranspirace
$H_t$	[mm d <sup>-1</sup> ]	bilance záření
$E_a$	[mm d <sup>-1</sup> ]	aerodynamický výpar
$f(u)$	[mm d <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> ]	aerodynamický odpor
$e_a$	[Pa]	aktuální tlak vodní páry
$e_s$	[Pa]	tlak nasycené vodní páry
$e_{am}$	[Pa]	napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru maximálních denních teplot
$e_{am}$	[Pa]	napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru minimálních denních teplot
$\Delta$	[Pa°C <sup>-1</sup> ]	sklon křivky napětí vodních par
$\gamma$	[Pa°C <sup>-1</sup> ]	psychrometrická konstanta
$r_a$	[s m <sup>-1</sup> ]	aerodynamický odpor
$r_s$	[s m <sup>-1</sup> ]	povrchový odpor
$r_l$	[s m <sup>-1</sup> ]	stomatální odpor optimálně osvětleného listu
$\rho_a$	[g cm <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu za konstatního tlaku
$\rho_s$	[g m <sup>-3</sup> ]	hustota půdního substrátu
$\rho_w$	[g cm <sup>-3</sup> ]	hustota vody
$\lambda$	[J kg <sup>-1</sup> ]	skupenské (latentní) teplo výparné
$c_p$	[J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	specifická izobarická tepelná kapacita
$G$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	tok tepla do půdy
$G_z$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	půdní tepelný tok v hloubce z
$R_n$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	čistá radiace
$R_s$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	solární radiace
$R_a$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	extraterestriální radiace
$J_n$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	čisté krátkovlnné záření
$L_n$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	čisté dlouhovlnné záření

$J_{t\downarrow}$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	dopadající krátkovlnné záření
$J_{o\uparrow}$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	odražené krátkovlnné záření
$L_{a\downarrow}$	[J m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	dopadající dlouhovlnné záření
$L_{g\uparrow}$	[J m <sup>-2</sup> D <sup>-1</sup> ]	dlouhovlnné záření vyzářené zemským povrchem
$C_v$	[J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita půdy
$c_s$	[J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita půdního substrátu
$c_w$	[J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita vody
$d$	[m]	efektivní výška porostu
$h_{min}$	[m]	minimální výška vegetace v průběhu vegetační sezóny
$h_{max}$	[m]	maximální výška vegetace v průběhu vegetační sezóny
$z_u$	[m]	výška měření rychlosti větru
$z_h$	[m]	výška měření vlhkosti vzduchu
$z_0$	[m]	součinitel dynamické drsnosti
$z_{0h}$	[m]	součinitel dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry
$\delta_z$	[m]	vzdálenost mezi měřením teploty přízemní vrstvy atmosféry a teploty půdy
$LAI_{active}$	[m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ]	index aktivní plochy listoví (dle FAO56)
$LAI_{Herza}$	[m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ]	index aktivní plochy listoví
$u$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost větru ve výšce $z_u$
$u_2$	[m s <sup>-1</sup> ]	horizontální rychlost větru měřená dva metry nad zemským povrchem
$T_{mean}$	[°C]	průměrná denní teplota
$T_{max}$	[°C]	maximální denní teplota
$T_{min}$	[°C]	minimální denní teplota
$T_a$	[°C]	průměrná měsíční teplota
$T_j$	[°C]	průměrná měsíční teplota vzduchu pro danou lokalitu
$I$	[°C]	teplotní index získaný součtem hodnot měsíčních indexů
$H_t$	[h]	průměrná délka denního slunečního svitu
$L$	[h]	průměrná délka slunečního svitu v měsíci
$N$	[d]	délka vegetační sezóny
$\alpha$	[-]	Priestley-Taylor koeficient
$\alpha$	[-]	regresní koeficient

$\kappa$	[-]	von Karmanova konstanta
$k(C)$	[-]	koeficient zahrnující charakteristiky plodiny a půdy
$k(T)$	[-]	vegetační faktor
$i$	[-]	pořadí dne v průběhu vegetační sezóny
$N$	[-]	počet dní v měsíci
$\Theta_{\delta z}$	[-]	podíl vodní složky
$\Phi_s$	[-]	podíl půdního substrátu

# 1. Úvod

Výpar je hlavní hybnou silou hydrologického cyklu Země navracející průměrně 64% procent srážek zpět do atmosféry. Celkový výpar, který se často označuje jako evapotranspirace, se vztahuje k určitému území. Souhrnně se jedná o kombinaci výparu z odlišných typů povrchu, a to výpar z volné hladiny nebo z půdy (evaporace) a výpar z rostlin (transpirace). Stanovení výparu je důležité pro správné hospodaření s vodními zdroji, zemědělství, lesnictví, energetiku, a také pro pochopení vztahů mezi změnami klimatu a využíváním půdy. Hlavní problém stanovení správné hodnoty výparu spočívá v tom, že se jedná o velmi složitý a komplikovaný proces měnící se v čase a prostoru ovlivněný mnoha faktory v jeho průběhu. Přímé stanovení evapotranspirace je finančně nákladné, experimentálně náročné a zatížené poměrně značnou nejistotou. Evapotranspiraci lze stanovit pomocí energetické nebo vodní bilance nebo prostřednictvím aerodynamických výpočetních mikrometeorologických metod. Jelikož každý přístup reprezentuje jiné prostorové a časové měřítko, srovnání jednotlivých technik je velice obtížné (Wallace, 1995).

Světový program pro výzkum klimatu (World Climate Research Programme, <https://www.wcrp-climate.org>) zaštilil řadu velkých mezinárodních studií (např. International Satellite Land Surface Climatology Project – ISLSCP, Global Energy and Water Exchange Experiment – GEWEX), které zdůraznily význam evapotranspirace pro studium globálního klimatu. Vedle celosvětového a regionálního významu evapotranspirace, mnoho místních studií a programů vyžaduje přesné hodnoty výparu pro účely modelování a kvantifikaci hydrologických procesů v povodí. Realistické modely evapotranspirace pro různé druhy vegetace nám umožňují lépe pochopit a předvídat případné vazby mezi vegetací a změnami klimatu. Při probíhajících klimatických změnách a současných obavách o kvalitu životního prostředí či potřebě řízení omezených vodních zdrojů a nutnosti zajistit produkci plodin pro rostoucí počet obyvatel, je nutnost spolehlivých přístupů pro kvantifikaci vypařování větší než kdy předtím.

Diplomová práce se zabývá principy a porovnáním různých výpočetních mikrometeorologických metod pro stanovení hodnoty výparu a vyhodnocením evaporace a evapotranspirace na základě mikrometeorologických měření. Porovnány budou výsledky experimentálního měření výparu s výsledky mikrometeorologických metod a bude vyhodnocena prostorová variabilita výparu z volné hladiny na extenzivní zelené střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradě v porovnání s přílehlou střechou pokrytou betonovou dlažbou.

V teoretické části je stručně představená teorie vypařování vody v přírodě, výpočetní mikrometeorologické metody a faktory ovlivňující výpar. V rešerši jsou uvedeny vybrané vědecké studie domácích a zahraničních autorů, které se zabývají problematikou stanovení výparu. V metodické části jsou charakterizovány klimatické poměry experimentálního centra UCEEB, dále je popsáno přístrojové vybavení a průběh jednodenního výparného experimentu. Následující části zahrnují postupy a výsledky vlastní práce a komentáře k získaným výsledkům. Doplnující rozsáhlé tabulky a grafické výsledky analýz jsou umístěny do příloh, aby nerušily plynulý tok textu práce.

Cílem diplomové práce je popsat metody stanovení výparu a provést rešerši studií zabývajících se problematikou stanovení výparu. Dále z údajů získaných z meteorologických stanic vyhodnotit výpar za dvě vegetační období a výsledky z jednotlivých stanic porovnat. Z výsledků získaných při vlastním terénním experimentu provést vyhodnocení prostorové variability výparu na zelené střeše a hodnoty porovnat s přílehlou střechou pokrytou betonovou dlažbou. Získané údaje zhodnotit podle vhodných kritérií a diskutovat.

## 2. Teorie vypařování vody v přírodě

V této části práce bude stručně představena teorie vypařování vody v přírodě. V celé práci bude pracováno s následujícími pojmy:

- a) Evaporace – výpar z volné hladiny nebo výpar z půdy
- b) Transpirace – výpar z rostlin
- c) Evapotranspirace – celkový výpar (fyzikální = evaporace + fyziologický = transpirace)
- d) Potenciální evapotranspirace – maximální možný výpar za daných podmínek neovlivněný vlhkostním nebo chemickým stresem
- e) Aktuální evapotranspirace – skutečný výpar probíhající v reálných přírodních podmínkách
- f) Referenční evapotranspirace – výpar z hypotetického povrchu, koncept dle FAO56

### 2.1. Evaporace

Evaporace je proces, při kterém kapalná voda absorbuje teplo, čímž se zvyšuje rychlost vodních molekul a ty, které získaly dostatečnou kinetickou energii i přes soudržnost kapaliny a existující povrchové napětí, výparný povrch opouštějí a mění se na vodní páru. Voda se může vypařovat z mnoha různých druhů povrchu, jako jsou oceány, moře, jezera, řeky, sníh a led, holá půda, mokrá vegetace nebo z různých umělých antropogenních povrchů (chodníky, silnice, střechy apod.). Evaporace je primární způsob, jakým se voda ve formě vodní páry navrací zpět do vodního cyklu. Při odpařování dochází k ochlazení okolního prostředí. Opačným procesem k evaporaci je kondenzace, ke které v přírodních podmínkách nejčastěji dochází, když je vlhký vzduch ochlazen za konstantního tlaku pod teplotu rosného bodu. Nad oceány převládá výpar oproti srážkám, zatímco nad pevninou srážky běžně výpar překračují. Intenzita výparu je nejčastěji udávána v milimetrech za uvažované období.

Výpar z volné vodní hladiny je považován za základní typ výparu a v porovnání s jinými druhy povrchů není limitován nedostatkem vody. Intenzita výparu je tak určena pouze atmosférickými podmínkami. Velikost vodní plochy ovlivňuje výpar dvěma způsoby. Vodní plochy větší než 10 m<sup>2</sup> v průměru mají vyšší rychlost odpařování v důsledku zvýšené rychlosti větru vyplývající z celkově hladšího povrchu (Wallace, 1995). Velikost tělesa vody také ovlivňuje teplotní stratifikaci. Maximální hloubka teplejší povrchové vrstvy je přímo závislá na velikosti vodní

plochy. Výpar ze sladkovodních ploch je v průměru vyšší než z mořské vody (Nash, 1989). Výpar z volné hladiny může být relativně snadno měřen pomocí výparoměru.

Pokud je výparným povrchem půda, důležitým parametrem pro výpar je stupeň zastínění povrchu od okolní vegetace a množství dostupné vody. Výpar z půdy je dále závislý na vlastnostech a stavu půdy, především na její struktuře, barvě a vlhkosti. Zdrojem vody jsou srážky, mělké podzemní vody nebo umělé zavlažování. Půdní voda je v půdním prostředí vázána gravitačními, kapilárními a osmotickými silami. Pokud je půda schopna dodávat požadované množství vody, výpar z ní ovlivňují pouze meteorologické podmínky a může dosahovat nebo překračovat hodnoty výparu z vodní hladiny. Důvodem je větší povrch, lepší tepelná vodivost a tmavší barevný odstín, čímž půda vstřebává více slunečního záření, tudíž se může lépe prohřát. V případě, kdy dostupnost vody je limitujícím faktorem, dochází k vysychání půdy a výpar z ní může být přerušen až na několik dní (FAO). Výpar z půdy má celkově tři fáze. První z nich je vypařování vody z nasyceného povrchu půdy do atmosféry. Druhá, pomalejší fáze výparu, je prostřednictvím kapilárních sil, které přivedou vodu k povrchu, odkud se může vypařovat. Ve třetí, nejpomalejší fázi, dochází po přetrhání kapilár k výparu vodních par skrze půdní. Jemnozrná půda má větší specifický povrch a tím i výraznější schopnost kapilárního vztlínání, což vede ke zvětšování výparu. Měření výparu z půdy se provádí půdními lyzimetry.

Ke kontinuální nepřerušované evaporaci dochází při splnění dvou základních požadavků. Prvním z nich je dostatek energie pro fázovou přeměnu kapalné vody na vodní páru. Tato energie se nazývá skupenské (latentní) teplo výparné,  $\lambda$ , a je dodávána slunečním zářením nebo prouděním teplého vzduchu z okolí ( $\lambda = 2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$  při  $20^\circ\text{C}$ ). Druhým požadavkem je dostatečná advekce okolního vzduchu, aby vodní pára mohla opustit výparný povrch (Penman, 1948). Tyto dva základní požadavky byly použity jako východisko pro analytické řešení evaporace (metody založené na energetické bilanci povrchu a transportu vodní páry v atmosféře).

První rovnice pro výpočet evaporace byla představena Johnem Daltonem v roce 1801. Daltonův experiment demonstroval, že hodnota výparu je úměrná rychlosti větru a deficitu tlaku vodních par. Pozdější práce založené na tomto principu vylepšily Daltonův výraz kalibrací pro různá prostředí.

V roce 1948 H.L. Penman zkombinoval metodu energetické bilance s metodou aerodynamickou a odvodil rovnici pro evaporaci z volné vodní hladiny ze standardních meteorologických měření, kterými jsou intenzita slunečního záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost větru. Zjednodušující předpoklady Penmanovy rovnice umožnily vypočítat intenzitu výparu z měření pouze v jedné výškové úrovni. Koeficienty všech přenosových rovnic (přenos latentního tepla, vodní páry a hybnosti) se navíc rovnají. V zásadě lze na Penmanovu rovnici nahlížet jako na kombinaci radiační a aerodynamické složky výparu:

$$E = \frac{\Delta \cdot H_t + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

Kde  $E$  je intenzita evaporace [ $\text{mm d}^{-1}$ ],  $H_t$  bilance záření [ $\text{mm d}^{-1}$ ],  $\Delta$  sklon křivky napětí vodních par [ $\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $\gamma$  psychrometrická konstanta [ $\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$ ] a  $E_a$  je aerodynamický výpar [ $\text{mm d}^{-1}$ ].

$$E_a = f(u) \cdot (e_a - e_s) \quad (2)$$

Kde  $f(u)$  je funkce aerodynamického odporu [ $\text{mm d}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ],  $e_a$  aktuální tlak vodní páry [Pa] a  $e_s$  tlak nasycené vodní páry [Pa].

Kalibrací pomocí lyzimetrů Penman odvodil pro aerodynamický odpor:

$$f(u) = 0,4 \cdot (1 + 0,17 \cdot u_2) \quad (3)$$

Kde  $u_2$  je horizontální rychlost větru měřená dva metry nad zemským povrchem [ $\text{m s}^{-1}$ ].

V tomto řešení H.L. Penman nebral v úvahu změny zásoby tepla a konduktivní toky způsobené vypařovanou vodou, protože je považoval za zanedbatelné v porovnání s ostatními energetickými toky.



## 2.2. Transpirace

Transpirace je hlavním procesem výdeje vody rostlinou a je ukončením tzv. transpiračního toku, který vede vodu z kořenů cévními svazky do listů. Při tomto procesu dochází k odpařování vody obsažené v tkáních rostlin a jejímu uvolnění do atmosféry. Rostliny odvádějí vodu a plynné složky ( $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ ) převážně prostřednictvím mikroskopických průduchů v listech nazývaných stomata (FAO). Úloha stomat v regulaci transpirace byla a je široce zkoumána (Ball, Woodrow a Berry, 1987; Casson a Hetherington, 2010; Fricker a Willmer, 2012). Mezi environmentální faktory, které ovlivňují odpor průduchů, patří intenzita slunečního záření, stav vody v listech, teplota listů a koncentrace oxidu uhličitého. Dohromady tyto faktory ovlivňují hodnotu veličiny nazývané stomatální odpor. Hodnota stomatálního odporu se zvyšuje za suchého počasí nebo v případě nízkého obsahu vody ve vegetaci. Během letního dne se ze zdravého listu rostliny odpaří množství vody několikanásobně převyšující hmotnost listu (Ziemer, 1979). Voda s živinami se do rostliny dostává prostřednictvím kořenového systému a je dále rozváděna rostlinou prostřednictvím xylému. Transport cukrů v rostlině je do značné míry oddělený od rozvodu vody a zajišťuje jej floém.

Transpirace, stejně jako evaporace, je závislá na dodávce energie, nasycení vzduchu vodními parami a rychlosti větru, tj. efektivitě odvodu vodních par. Proto je obdobně jako v případě evaporace důležitá intenzita sluneční radiace, rychlost větru, teplota a vlhkost vzduchu. Obsah vody v půdě a schopnost půdy dodávat vodu kořenům rostlin určují míru transpirace, obdobně jako salinita půdní vody. Transpirace je také ovlivněna rozdílnou fyziologií rostlin, aspekty životního prostředí a v případě zemědělských plodin agrotechnickými postupy. Z toho plyne, že různé rostliny v různém prostředí a vegetačním období mají odlišnou míru transpirace.

## 2.3. Evapotranspirace

Evapotranspirace je kombinace výparu z dvou odlišných povrchů, kdy výpar z vodního nebo půdního povrchu je označován jako evaporace a výpar z vegetace je označován jako transpirace. V obou případech je kapalina přeměněna na vodní páru a je unášena z povrchu pryč. Zatímco klimatologické parametry určují schopnost prostředí odebrat vodu z povrchu či vegetace, charakteristiky povrchu a vegetace a množství dostupné vody určují míru vypařené vody (Penman, 1948; Monteith, 1965). Studie prokázaly, že téměř 90% vlhkosti v atmosféře

pochází z evaporace vody z oceánů, moří, jezer, řek a půdy, zatímco zbývajících 10% připadá na transpiraci. Velmi malé množství vodní páry vstupuje do atmosféry skrze sublimaci, proces, kterým se voda z pevné látky (led nebo sníh) mění přímo na vodní páru (FAO).

Evaporace a transpirace probíhají současně, a proto není snadné rozlišit zastoupení jednotlivých složek evapotranspirace (Allen et al., 1998). Poměr mezi evaporací a transpirací se mění v čase a prostoru. Na počátku vegetačního období, kdy vegetace není ještě dostatečně vzrostlá, se voda vypařuje hlavně z půdního povrchu. Oproti tomu v pozdější fázi vegetačního období, kdy je vegetace dobře rozvinutá, se stává transpirace dominantním procesem (Sumner a Jacobs, 2005).

Ačkoliv komplexní charakter evapotranspirace vyžaduje uvažovat všechny relevantní faktory, v začátcích zkoumání evapotranspirace byl jejich rozsah omezen. První studie nebraly například v potaz půdní typ, druh vegetace nebo kořenový systém. Zaměřovaly se spíše na půdy zamokřené deštěm nebo závlahou (Penman, 1948). Počáteční velmi zjednodušené koncepty byly později dále rozvíjeny a rozšířeny o mnoho faktorů, aby poskytovaly realističtější hodnoty evapotranspirace (Monteith, 1965; Wright a Jensen, 1972).

## **2.4. Potenciální evapotranspirace**

Potenciální evapotranspirace  $ET_p$  představuje maximální možný výpar v daném čase, který by nastal v daném místě pokrytém souvislým vzrostlým vegetačním porostem za podmínky nelimitujícího přísunu vody v půdním profilu a aktuálních klimatických podmínkách (jako jeden z prvních např. Doorenbos et al., 1977). Nicméně tato definice obsahuje jisté nejasnosti, jelikož není spojena s konkrétním druhem rostliny a půdy, a proto je možné najít mnoho definic, jejichž formulace je přizpůsobena konkrétní projektu nebo studii. Burman a Pochop (1994) zdůraznili tento problém s nekonzistencí metod, stejně jako v definicích základních pojmů, jako je "aktuální", "potenciální" nebo "referenční" evapotranspirace. Každopádně se jako vhodnější a snadnější jevil výpočet potenciální evapotranspirace než stanovení evapotranspirace aktuální.

V roce 1965 John Lennox Monteith rozšířil Penmanovu rovnici (1) o nový parametr – povrchový odpor. Jedná se tak o rovnici výparu pro nenasycený povrch, který je charakterizovaný tím, že aktuální tlak vodní páry je nižší než tlak nasycené vodní páry. Penmanova-Monteithova rovnice je vyjádřena následovně (Monteith, 1965):

$$\lambda ET_p = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (4)$$

Kde  $ET_p$  je intenzita potenciální evapotranspirace [ $\text{mm d}^{-1}$ ],  $\lambda$  skupenské (latentní) teplo výparné [ $\text{J kg}^{-1}$ ],  $R_n$  čistá solární radiace [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $G$  tok tepla do půdy [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]  $\rho_a$  hustota vzduchu za konstantního tlaku [ $\text{g cm}^{-3}$ ],  $c_p$  specifická izobarická tepelná kapacita [ $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ],  $r_a$  aerodynamický odpor [ $\text{s m}^{-1}$ ] a  $r_s$  povrchový odpor [ $\text{s m}^{-1}$ ].

Čistá radiace je výsledkem bilance energií krátkovlnného a dlouhovlnného záření v úrovni výparného povrchu.

$$R_n = J_n + L_n = J_{t\downarrow} - J_{o\uparrow} + L_{a\downarrow} - L_{g\uparrow} \quad (5)$$

Kde  $J_n$  čisté krátkovlnné záření [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $L_n$  čisté dlouhovlnné záření [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $J_{t\downarrow}$  dopadající krátkovlnné záření [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $J_{o\uparrow}$  odražené krátkovlnné záření [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $L_{a\downarrow}$  dopadající dlouhovlnné záření [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ] a  $L_{g\uparrow}$  dlouhovlnné záření vyzářené zemským povrchem [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ].

Čtyři dílčí faktory ovlivňující proces výparu z půdy a rostlin byly zakomponovány do původní rovnice. Tři parametry povrchového odporu – stomata, kutikula a půda jsou souhrnně obsaženy v parametru  $r_s$  – povrchový odpor. Aerodynamický odpor ( $r_a$ ) popisuje přenos tepla a vodní páry z vypařujícího povrchu do bezprostředně přiléhající vrstvy. Jedná se o odpor, který klade vegetace proudícímu vzduchu. Povrchový odpor popisuje míru kladeného odporu průtoku par skrze transpirující vegetaci a půdu (Monteith 1965). Tyto procesy jsou velmi komplikované a liší se v čase a v prostoru vlivem mnoha vegetačních, meteorologických a půdních faktorů. Ačkoliv bylo provedeno mnoho studií na toto téma (Beljaars a Viterbo, 1994;

Cleverly a Eamus, 2013; Lynn a Carlson, 1990), pouze některé přístupy jsou použitelné pro popis vegetačních a aerodynamických faktorů odporu.

Aerodynamický odpor může být vyjádřen podle vztahu (Allen et al., 1993):

$$r_a = \frac{\ln \left[ \frac{z_u - d}{z_0} \right] \cdot \ln \left[ \frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{\kappa^2 \cdot u} \quad (6)$$

Kde  $z_u$  je výška měření rychlosti větru [m],  $z_h$  výška měření vlhkosti vzduchu [m],  $d$  efektivní výška porostu [m],  $z_0$  součinitel dynamické drsnosti [m],  $z_{0h}$  součinitel dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry [m],  $\kappa$  von Karmanova konstanta ( $\kappa = 0,41$ ) a  $u$  rychlost větru ve výšce  $z_u$  [ $\text{m s}^{-1}$ ].

Povrchový odpor lze vyjádřit podle vztahu (Allen et al., 1993):

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (7)$$

Kde  $r_l$  je stomatální odpor optimálně osvětleného listu [ $\text{s m}^{-1}$ ] ( $r_l = 100 \text{ s m}^{-1}$ ) a  $LAI_{active}$  index aktivní plochy listoví [ $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ].

$LAI_{active}$  se vypočítá ze vztahu (Allen et al., 1993):

$$LAI_{active} = 0,5 \cdot 24 \cdot d \quad (8)$$

Kde  $d$  je efektivní výška porostu [m].

V případě výpočtů hodnoty evapotranspirace v nadcházejících částech práce bude hodnota  $d$  v souladu s metodikou FAO56 uvažována hodnotou 12 cm. Tato hodnota bude uvažována konstantní pro celé vegetační období. Výška vegetace se nicméně v průběhu vegetačního období mění a tím se mění i hodnota povrchového odporu. Možnou alternativou k metodice Allena et al. (1993) může být stanovení hodnoty  $LAI$  za použití empirické rovnice, kterou navrhl Herza (2005) na základě výzkumu Holuba (2000):

$$LAI_{Herza} = 5 \left[ (h_{max} - h_{min}) \sin \left( \ln \left( 1 + 8 \frac{i}{N} \right) \right) + h_{min} \right] \quad (9)$$

Kde  $h_{max}$  je maximální výška vegetace v průběhu vegetační sezóny [m],  $h_{min}$  minimální výška vegetace v průběhu vegetační sezóny [m],  $i$  pořadí dne v průběhu vegetační sezóny [-] a  $N$  délka vegetační sezóny [d].

Rovnice zohledňuje růst vegetace na začátku vegetačního období, vegetační vrchol a postupný ústup vegetace ke konci vegetačního období.

Tok tepla do půdy je energie, kterou půda absorbuje nebo vyzařuje. V případě výpočtu hodnoty evapotranspirace za použití Penmanovy-Monteithovy rovnice (4) v hodinovém kroku se hodnoty toku tepla do půdy nezanedbávají jako je tomu v případě výpočtu v denním kroku, jelikož suma hodnot toku tepla do půdy v průběhu dne a noci je rovna přibližně nule. Pro stanovení hodnoty toku tepla do půdy mohou být použity různé výpočetní postupy. Nejběžnějším z nich je výpočet dle metodiky FAO56 (Allen et al., 1998). Dále mohou být použity kalorimetrická rovnice nebo advekčně-konduktivní transportní rovnice.

Výpočet dle metodiky FAO56 využívá k určení hodnoty toku tepla do půdy naměřené hodnoty čisté radiace. V průběhu dne se hodnota toku tepla stanoví dle vzorce:

$$G_{FAO56} = 0,1R_n \quad (10)$$

Tok tepla do půdy v průběhu noci se stanoví ze vztahu:

$$G_{FAO56} = 0,5R_n \quad (11)$$

Kalorimetrická rovnice je jednou z nejběžněji používaných metod pro stanovení toku tepla do půdy (Gentine et al., 2012; Wang a Bou-Zeid, 2012). Často je tato metoda používána jako referenční při porovnání ostatních metod pro určení hodnoty toku tepla do půdy (Wang a Bou-Zeid, 2012). Tato metoda předpokládá, že půdní tepelné toky jsou v dostatečné hloubce a jsou tak chráněny před povrchovými vlivy.

Tok tepla do půdy se dle kalorimetrické rovnice vypočítá:

$$G_{kal} = G_z + C_v \frac{\partial T}{\partial t} \delta_z = 0 + C_v \frac{\partial T}{\partial t} \delta_z \quad (12)$$

Kde  $G_z$  je půdní tepelný tok v hloubce  $z$  [ $\text{W m}^{-2}$ ],  $C_v$  měrná tepelná kapacita půdy [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ],  $\partial T/\partial t$  rozdíl teploty půdy za časový úsek [ $\text{K/s}$ ] a  $\delta_z$  vzdálenost mezi místem měření teploty půdy a povrchem půdy [ $\text{m}$ ].

Tepelný tok v hloubce  $z$  ( $G_z$ ) se při výpočtech v této práci zanedbává.

Měrná tepelná kapacita půdy se stanoví ze vzorce:

$$C_v = \Phi_s \rho_s c_s + \Theta_w \rho_w c_w \quad (13)$$

Kde  $\rho_s$  je hustota půdního substrátu [ $\text{g cm}^{-3}$ ],  $\rho_w$  hustota vody [ $\text{g cm}^{-3}$ ],  $c_s$  měrná tepelná kapacita půdního substrátu [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ],  $c_w$  měrná tepelná kapacita vody [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ],  $\Theta_w$  podíl vodní složky [-] a  $\Phi_s$  podíl pevných částic půdního substrátu [-].

Advekčně-konduktivní transportní rovnice pro určení hodnoty toku tepla do půdy se skládá ze dvou členů. Advekční člen se v případě této práce zanedbává, hodnota toku tepla do půdy je rovna hodnotě konduktivního členu rovnice.

$$G_{a-k} = q_i c_w T_i - \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0 - \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \quad (14)$$

Kde  $q_i$  je hustota toku půdní vody [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $T_i$  specifická teplota [ $\text{K}$ ],  $\lambda_i$  zdánlivá tepelná vodivost [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $\partial T$  rozdíl hodnot teploty přízemní vrstvy atmosféry a teploty půdy [ $\text{K}$ ] a  $\partial z$  vzdálenost mezi měřením teploty přízemní vrstvy atmosféry a teploty půdy [ $\text{m}$ ].

Hodnota zdánlivé tepelné vodivosti se liší pro půdu nasycenou a nenasycenou. V případě nasycené půdy je hodnota zdánlivé tepelné vodivosti rovna  $0,482 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , pro nenasycenou půdu  $0,1 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

Pro výpočet potenciální evapotranspirace bylo vytvořeno mnoho výrazně zjednodušených empirických vztahů. U většiny těchto empirických rovnic postačují jeden nebo dva základní meteorologické údaje. Příkladem může být metoda výpočtu podle Thornthwaita nebo Papadakise.

Výpočet podle Thornthwaita (1948) je založený pouze na průměrných měsíčních teplotách vzduchu. Výhodou této metody je možnost stanovení míry evapotranspirace na území s minimálními meteorologickými informacemi. Nevýhodou však je nedostatečná přesnost a v případě průměrné měsíční teploty vzduchu menší nebo rovné nule vychází potenciální evapotranspirace jako nulová. Další nevýhodou je použití pouze na delší časové období (Novák, 1995). Rovnice má následující tvar:

$$ETp = 16 \left( \frac{L}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10T_a}{I} \right)^\alpha \quad (15)$$

Kde  $L$  je průměrná délka slunečního svitu v měsíci [h],  $N$  počet dní v měsíci [-],  $T_a$  průměrná měsíční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ] (pokud je hodnota záporná, dosazuje se nula),  $I$  teplotní index získaný součtem hodnot měsíčních indexů [ $^{\circ}\text{C}$ ] a  $\alpha$  regresní koeficient ( $\alpha = (0,0675 I^3 - 7,71 I^2 + 1792 I + 49239) \cdot 10^{-5}$ ).

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad i_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1,514} \quad (16)$$

Kde  $T_j$  je průměrná měsíční teplota vzduchu pro danou lokalitu [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Dalším možným způsobem určení potenciální evapotranspirace je výpočet podle Papadakise. Tento vzorec udává hodnoty potenciální evapotranspirace pro měsíční kroky (Chanduvi-Acuña, 1969):

$$ETp = 0,001875 \cdot (e_{am} - e_{dm}) \quad (17)$$

Kde  $e_{am}$  je napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru maximálních denních teplot [Pa] a  $e_{dm}$  napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru minimálních denních teplot [Pa].

U potenciální evapotranspirace se předpokládá absence vlivu koncentrace rozpuštěných látek v půdě, vlhkostního a chemického stresu, a proto je potenciální evapotranspirace vždy větší než skutečná evapotranspirace (FAO).

## 2.5. Aktuální evapotranspirace

Aktuální evapotranspirace  $ET_a$  představuje množství vody, které se skutečně odpaří a které probíhá v reálných přírodních podmínkách za dané (aktuální) půdní vlhkosti (Allen et al., 1994). Pokud má povrch dostatečné množství vody a je v dobrém stavu, pak se intenzita aktuální evapotranspirace blíží k potenciální evapotranspiraci ( $ET_p$ ). Při kvantifikaci aktuální evapotranspirace musí být brány v úvahu všechny vlivy včetně nedostatku vody, vegetační onemocnění, stínění způsobené vyššími rostlinami, rozdílnosti ve vegetačním krytu a mnoho dalších faktorů, které z určení aktuální evapotranspirace činí obtížný úkol. Hodnoty aktuální evapotranspirace jsou vždy nižší než hodnoty potenciální evapotranspirace, přičemž ve vegetačním období jsou rozdíly nejvíce patrné (FAO). Mnoho výpočetních modelů pro určení aktuální evapotranspirace nejprve stanoví potenciální evapotranspiraci, kterou poté upraví za použití různých faktorů. Měřit aktuální evapotranspirace lze prostřednictvím půdních lyzimetrů jako rychlost ztráty vody z půdy (Wallace, 1995).

## 2.6. Referenční evapotranspirace

Referenční evapotranspirace ( $ET_0$ ) je obecným přístupem k řešení problematiky výparu a byla zavedena z důvodu požadavku zemědělské praxe definovat míru evapotranspirace nezávisle na typu plodiny, jejím vývojovém stadiu a pěstitelských postupech (Doorenbos et al., 1977).

Ve většině evapotranspiračních studií (např. Wright a Harding, 1993) je potenciální evapotranspirace přepočítávána z referenční evapotranspirace ( $ET_0$ ) za použití vegetačního faktoru  $k(T)$  definovaného pro každou plodinu. Vegetační faktor může být ve formě



jednoduchého koeficientu nebo ve formě proměnné, která je funkcí řady parametrů v závislosti na vegetačním období rostliny. Pro potenciální evapotranspiraci potom platí:

$$ETp = k(T) \cdot ET0 \quad (18)$$

Ostatní metody zahrnují různé vegetační charakteristiky přímo do Penmanovy-Monteithovy rovnice (Summer a Jacobs, 2005). V obou případech je nezbytné popsat vývoj vegetace, jako je například množství biomasy (Wright a Harding, 1993) nebo aktivní listová plocha (Summer a Jacobs, 2005). Všichni výše uvedení autoři zdůraznili důležitost vyšetřování vegetačních charakteristik. Referenční evapotranspirace je potom vypočtena z potenciální evapotranspirace ( $ETp$ ) za specifických parametrů vegetace.

Bez ohledu na odlišnosti mezi procesem evapotranspirace a evaporace, volná vodní hladina byla použita jako první referenční plocha. Později byl jako referenční plocha zaveden krátce střižený trávník z důvodu začlenění vegetačních parametrů. Travnatá plocha byla vybrána, jelikož její aerodynamické a povrchové vlastnosti byly poměrně důkladně prozkoumány a je široce rozšířená po celém světě. Kvůli eliminaci rozmanitosti travních porostů a půdních podmínek (výška trávy, zakrytí povrchu, vodní stres) byl zaveden referenční travní porost přesně daných parametrů. V této práci se používá referenční travní porost dle metodiky FAO56: *“Hypotetická referenční plodina s předpokládanou konstantní výškou 0,12 m, fixním povrchovým odporem  $70 \text{ sm}^{-1}$  a albedem 0,23, plným zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou “*

Referenční evapotranspiraci je potom možné vypočítat za pomoci Penmanovy-Monteithovy rovnice upravené z rovnice (4). Pro výpočet evapotranspirace pro denní nebo delší časové období má rovnice z metodiky FAO tento tvar:

$$ET0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (19)$$

Kde  $ET0$  je referenční evapotranspirace [ $\text{mm d}^{-1}$ ] a  $T$  průměrná denní teplota měřená ve výšce dva metry nad zemským povrchem [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Takto definovaná referenční evapotranspirace je výhradně určená meteorologickými parametry a její hodnoty nejsou závislé na druhu porostu, jeho vývojovém stádiu ani na vlastnostech půdy. Ačkoliv bylo vytvořeno mnoho přístupů pro stanovení referenční evapotranspirace (např. Stricker a Brutsaert, 1978), Penmanova-Monteithova rovnice je doporučována jako standardní metoda, jelikož poskytuje nejpřesnější výsledky (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Xu a Singh, 2000; Droogers a Allen, 2002).

Pro stanovení referenční evapotranspirace v případě dostupnosti pouze omezených meteorologických údajů je možné použít alternativní metody stanovení *ET<sub>0</sub>*, jako například Hargreaves (Hargreaves a Samani, 1985) nebo Priestley-Taylor (Priestley a Taylor, 1972) vyžadující méně meteorologických parametrů. Další možností je nepřímé určení jednotlivých parametrů Penmanovy-Monteithovy rovnice z dostupných meteorologických dat (Allen et al., 1998).

Mnoho studií považuje Hargreavesovu empirickou rovnici (Hargreaves a Samani, 1995) jako vhodnou možnost stanovení referenční evapotranspirace s minimem dostupných meteorologických dat (Allen et al., 1998, Xu a Singh, 2000; Droogers a Allen, 2002). Základní tvar Hargreavesovy rovnice vyžaduje pouze údaje o slunečním záření a průměrné denní teplotě a udává hodnoty denní referenční evapotranspirace.

$$ET_0 = 0,0000000135 \frac{R_s}{\lambda} (T_{mean} + 17,8) \quad (20)$$

Kde  $R_s$  je solární radiace [ $J m^{-2} d^{-1}$ ].

V případě, že nejsou dostupné údaje o solární radiaci, lze použít upravenou Hargreavesovu rovnici vyžadující pouze údaje o teplotě a extraterestriální radiaci (tj. insolaci na horním okraji atmosféry pro danou zeměpisnou šířku a den):

$$ET0 = 0,0000000023 \cdot (T_{mean} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad (21)$$

Kde  $T_{mean}$  je průměrná denní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_{max}$  maximální denní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_{min}$  minimální denní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ] a  $R_a$  extraterestriální radiace [ $\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]

Vzhledem k empirickému charakteru Hargreavesovy rovnice by měly být všechny konstanty ověřeny pro každý region za pomoci Penmanovy-Montheitovy rovnice využitím dat naměřených v meteorologické stanici (Allen et al., 1998).

Priestleyho-Taylorova metoda (1972) pro výpočet denní referenční evapotranspirace  $ET0$  nahrazuje aerodynamický člen Penmanovy rovnice bezrozměrným empirickým koeficientem  $\alpha$ . V tomto vzorci je tak využita pouze radiační část, čímž se výpočet značně zjednoduší. Ve své práci Priestley a Taylor zjistili, že aerodynamický člen Penmanovy rovnice má podstatně nižší význam na určení velikosti výparu než radiační člen. Konkrétně byl význam aerodynamického členu odhadnut na 26%. Rovnice je vhodná pro stanovení  $ET0$  v případě, kdy nejsou dostupné údaje o relativní vlhkosti vzduchu a rychlosti větru.

$$ET0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda} \cdot \alpha \quad (22)$$

Kde  $\alpha$  je Priestley-Taylor koeficient [-] ( $\alpha = 1,26$ ).

Další z možností určení denní referenční evapotranspirace je Hamonova rovnice (Haith a Shoemaker, 1987) vyjádřena ve tvaru:

$$ET0 = \frac{2,1 \cdot H_t^2 \cdot e_s}{T_{mean} + 273,2} \quad (23)$$

Kde  $H_t$  je průměrná délka denního slunečního svitu [h].

Následují dvě regresní rovnice pro odhad denní referenční evapotranspirace, které využívají k výpočtu solární a čistou radiaci (Irmak et al., 2003):

$$ET0 = -0,611 + 0,149R_s + 0,079T_{mean} \quad (24)$$

$$ET0 = 0,489 + 0,289R_n + 0,023T_{mean} \quad (25)$$

## **2.7. Faktory ovlivňující evapotranspiraci**

Počasí, charakteristiky plodin, pěstitelské postupy a environmentální aspekty jsou základní faktory, které ovlivňují evaporaci a transpiraci.

### **Aktuální stav atmosféry**

Mezi hlavní parametry počasí, které ovlivňují evaporaci a transpiraci patří radiální příkon, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru a dodávka vody na výparný povrch. Evaporační potenciál atmosféry je vyjádřen za pomoci referenční evapotranspirací *ET0* (FAO).

### **Charakteristika plodin**

Typ plodiny, odrůda a vývojové stádium musí být zváženy při posuzování evapotranspirace. Výška plodiny, její drsnost, odrazivost, pokrytí půdy a zakořenění mají za následek rozdílné hodnoty evapotranspirace různých druhů plodin za stejných klimatických podmínek (FAO).

### **Pěstitelské postupy a environmentální aspekty**

Faktory jako salinita půdy, nízká úrodnost půdy, omezené používání hnojiv, přítomnost půdních horizontů s nízkou hydraulickou vodivostí, absence kontroly chorob a škůdců a špatné hospodaření s půdou mohou omezit vývoj plodin a snížit tak evapotranspiraci. Další faktory, které by měly být brány v úvahu při posuzování evapotranspirace, jsou pokrytí půdy vegetací, hustota a rozmístění rostlin nebo vlhkost půdy. Vliv vlhkosti půdy na evapotranspiraci je dán především hydraulickými charakteristikami půdního povrchu. Případné přemokření může způsobit poškození kořenového systému a limitovat transpirační toky v rostlině (FAO).

Při posuzování evapotranspirace by měly být vzaty do úvahy pěstitelské postupy. Kultivační postupy a metody a zavlažování mohou změnit mikroklima, charakteristiky plodin nebo mohou způsobit zamokření půdy a povrchu rostlin. Větrolamy redukují rychlost větru a tím snižují velikost evapotranspirace. Tento aspekt je obzvláště patrný ve větrných, teplých a suchých oblastech. Mulčování, obzvláště když rostliny ještě nejsou příliš vzrostlé, je dalším způsobem jak snížit intenzitu půdní evaporace (FAO).

## 3. Metody

### 3.1. Popis lokality

Evaporační experiment a vyhodnocení evapotranspirace bylo provedeno na extenzivní zelené střeše a přilehlých plochách Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT (University Centre for Energy Efficient Buildings – UCEEB) nacházející se v Buštěhradu v České republice (nadmořská výška 355 m n. m., souřadnice 50°09'24,8"N



Obr. 1: Poloha UCEEB.

14°10'10,8"E). Klimatické podmínky této oblasti jsou klasifikované jako mírné klima s průměrným ročním úhrnem srážek 552 mm (1995 – 2014) a průměrnou teplotou 8°C (1961 – 1990). Zelená střecha budovy má obdélníkový tvar a celkovou výměru 941 m<sup>2</sup>. Oproti okolnímu terénu je vyvýšena o 10 metrů. Její průměrný sklon je 2%. Původně byla střecha projektována jako extenzivní (tj. bezúdržbová). K užívání byla zelená střecha předána v polovině roku 2014. V době evaporačního experimentu se vegetace na zelené střeše vyskytovala pouze částečně. Zbylé plochy tvořil pouze půdní substrát či uschlá vegetace. V průběhu let 2015 a 2016, pro které byla evapotranspirace také hodnocena, byl stav pokrytí zelené střechy podobný, jako v den evaporačního experimentu. Jak v roce 2015 tak i v roce 2016 došlo k tomu, že vegetace, která na střeše vzrostla na počátku vegetační sezóny, uschla v průběhu letních měsíců a do konce vegetační sezóny už nedošlo k jejímu obnovení. Měřícími zařízeními bylo centrum plně vybaveno v červnu roku 2014. Meteorologické stanice umístěné na třech lokalitách poskytují údaje o teplotě vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, tlaku vzduchu, rychlosti a směru větru, solární radiaci a intenzitě deště.



Obr. 2: Pohled na zelenou střechu experimentálního centra UCEEB v den evaporačního experimentu dne 25. června 2015. V levém horním rohu pohled na část střechy pokryté betonovými dlaždicemi se světlíky.



Obr. 3: Meteorologická stanice a dva vážené segmenty umístěné na zelené střechě experimentálního centra UCEEB dne 25. června 2015.

### 3.2. Popis přístrojového vybavení

V této části práce bude stručně představeno přístrojové vybavení, kterým byly monitorovány jednotlivé meteorologické veličiny. Uveden bude výrobce, princip měření, rozsah měření, přesnost měření a umístění. Všechny meteorologické veličiny se na jednotlivých stanovištích do záznamového zařízení zapisují v minutových intervalech. Stanoviště 1 (Roof Station) se nachází na zelené střeše objektu, stanoviště 2 (North-East Station) je umístěno na travnaté ploše severovýchodně od budovy a stanoviště 3 (South-West Station) se nachází na ploše pokryté zatravněvacími dlaždicemi jihozápadně od hlavní budovy. Meteorologické stanice jsou záměrně umístěny na různých površích a také s různou orientací vůči budově. Žádné umístění nespĺňuje klasické meteorologické standardy, jelikož jedním z cílů měření je zjistit, do jaké míry přítomnost budovy meteorologické veličiny ovlivňuje. Dalším důvodem tohoto rozmístění meteorologických stanic je potřeba zjistit, jakým způsobem působí vnější podmínky na plášť budovy.



Obr. 4: Rozmístění meteorologických stanic (zdroj <http://147.32.99.40:5001/index.html>).



## **Teplotní a vlhkostní čidlo CS215**

**Výrobce:** Campbell Scientific

**Použití:** Měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu

**Princip měření:** Snímač využívající jeden čip, který v sobě zahrnuje teplotní a vlhkostní senzor. Při měření stíněný radiacním krytem 41303-5A omezujícím vliv slunečního záření na měření teploty.

**Měření teploty:**

**Rozsah měření:** -40°C až 70°C

**Přesnost měření:** ±0,4°C od 5°C do 40°C

**Měření vlhkosti:**

**Rozsah měření:** 0% až 100% (při teplotě od -20°C do 60°C)

**Přesnost měření:** ±4% v rozsahu od 0% do 100% (při teplotě 25°C)

**Umístění:** Všechna stanoviště.

## **Teplotní čidlo 107**

**Výrobce:** Campbell Scientific

**Použití:** Měření doplňkových teplot vzduchu

**Princip měření:** Teplotní čidlo využívající k měření teploty termistor. Při měření stíněný radiacním krytem 41303-5A omezujícím vliv slunečního záření na měření teploty.

**Rozsah měření:** -35°C až 50°C

**Přesnost měření:** ±0,10°C od 0°C do 50°C; Pro záporné teploty je přesnost měření nižší až čtyřikrát.

**Umístění:** Všechna stanoviště.

### **Anemometr A100R**

**Výrobce:** Vector Instruments

**Použití:** Měření rychlosti větru

**Princip měření:** Magnet se otáčí společně s hřídelí rotoru a produkuje tak měnící se magnetické pole, které způsobí, že rtuť ve styku jazýčkového spínače přeruší kontakt jednou za otáčku rotoru.

**Rozsah měření:**  $0,2 \text{ ms}^{-1}$  až  $75 \text{ ms}^{-1}$

**Přesnost měření:**  $\pm 0,1 \text{ ms}^{-1}$  pro rychlost větru  $0,3-10 \text{ ms}^{-1}$

**Umístění:** Všechna stanoviště.

### **Větrná korouhev W200P**

**Výrobce:** Vector Instruments

**Použití:** Určení směru větru

**Princip měření:** Větrná korouhev s potenciometrem.

**Rozsah měření:**  $0,6 \text{ ms}^{-1}$  až  $75 \text{ ms}^{-1}$

**Přesnost měření:**  $\pm 2^\circ$  při ustáleném větru rychlosti větší jak  $5 \text{ ms}^{-1}$

**Umístění:** Všechna stanoviště.

### **Čidlo tlaku vzduchu CS100**

**Výrobce:** Campbell Scientific

**Použití:** Měření tlaku vzduchu

**Princip měření:** Kapacitní snímač tlaku, který používá elektrický kondenzátor Setra.

**Rozsah měření:** 600 až 1100 hPa

**Přesnost měření:**  $\pm 0,5 \text{ hPa}$  při  $20^\circ\text{C}$

**Umístění:** Stanoviště 1

## **Radiometer CNR4**

**Výrobce:** Kipp and Zonen

**Použití:** Měření sluneční radiace

**Princip měření:** Radiometr se skládá z dvojice pyranometrů, kdy jeden je umístěn směrem nahoru a druhý směrem dolů, a dvojice pyrgeometrů ve stejné konfiguraci. Pyranometry měří krátkovlnné solární záření, pyrgeometry dlouhovlnné záření.

**Pyranometry:**

**Rozsah měření:** 305 až 2800 nm

**Přesnost měření:** <10% pro denní součty

**Pyrgeometry:**

**Rozsah měření:** 4,5  $\mu\text{m}$  až 42  $\mu\text{m}$

**Přesnost měření:** <10% pro denní součty

**Umístění:** Stanoviště 1

## **Radiometr NR-Lite2**

**Výrobce:** Campbell Scientific

**Použití:** Měření sluneční radiace

**Princip měření:** Radiometr skládající se ze dvou senzorů (termočlánků). Horní senzor měří solární energii a dlouhovlnné záření dopadající z atmosféry, spodní senzor měří energii odraženou od zemského povrchu.

**Rozsah měření:** 0,2  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$

**Umístění:** Stanoviště 2 a 3

### 3.3. Popis evaporačního experimentu

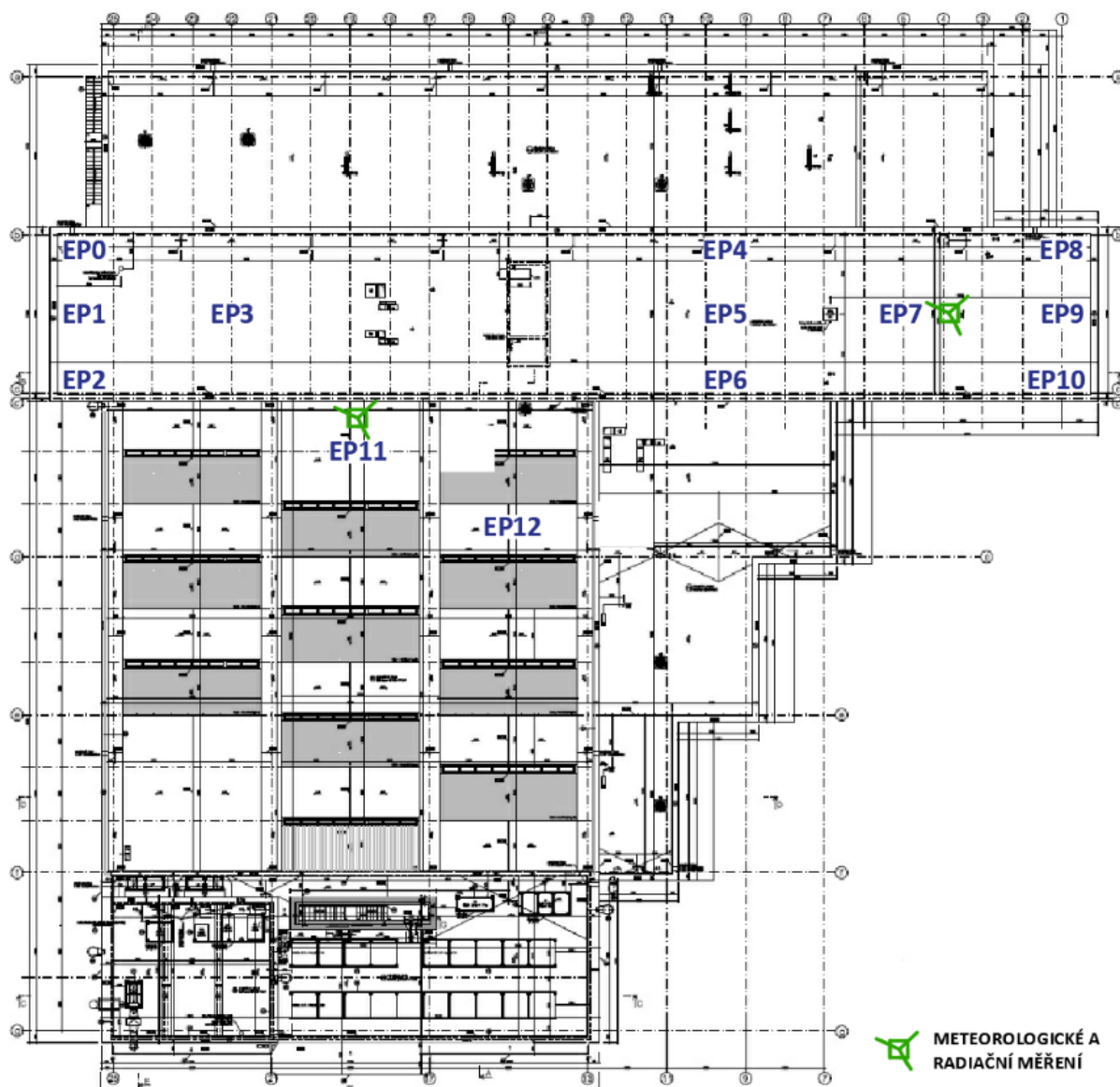
Evaporační experiment byl proveden dne 25. června 2015. Tento den byl bezdeštný, od 10 do 18 hodin proměnlivě polojasný až oblačný a vál převážně jižní až jihozápadní vítr. Průměrné hodnoty jednotlivých meteorologických veličin pro tento den jsou uvedeny v Tab. 1. Očekávaná evaporační výška pro tento den byla více jak 5 mm. Během noci před měřením ani během experimentu nebyly dosaženy podmínky pro vznik rosy, tj. přízemní teplota vzduchu nedosáhla teploty rosného bodu. Východ slunce nastal v čase 4:52 a západ slunce ve 21:13 SELČ.

Tab. 1: Základní meteorologické charakteristiky dne 25. června 2015. Hodnoty jsou získány z minutových dat měřených meteorologickou stanicí na zelené střeše.

VELIČINA	MINIMUM	MAXIMUM	ARIT. PRŮMĚR
TEPLOTA VZDUCHU 2 m (°C)	10,6	22,6	16,6
PŘÍZEMNÍ TEPLOTA VZDUCHU (°C)	10,2	37,4	17,1
RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU (%)	38,4	85,9	63,4
ČISTÁ RADIACE (W/m <sup>2</sup> )	-86,8	721,2	117,1
RYCHLOST VĚTRU (m/s)	0,0	3,7	1,2

Celkem třináct prázdných čirých plastových nádob určených pro experiment bylo ve večerních hodinách dne 24. 6. 2015 zváženo a změřeno (průměrná hmotnost 30 g, plocha 165,78 cm<sup>2</sup>) a naplněno z odměrných válců vodou o objemu 900 ml. Poté proběhlo první kontrolní vážení elektronickou vahou OHAUS Adventurer Pro AV8101 (rozlišení 0,1 g) a nádoby byly uschovány ve vnitřních prostorách objektu. V ranních hodinách před východem slunce byly nádoby s vodou opět zváženy a rozmístěny po zelené střeše a přilehlých střešních plochách dle Obr. 5. Měrné lokality na zelené střeše a jejím okolí byly vybrány tak, aby zahrnovaly všechna typická místa s ohledem na očekávaný vliv atik, světlíků a dalších konstrukcí instalovaných na střeše. Před měřením byly měrné lokality na zelené střeše vyrovnány pomocí úpravy terénu, na betonové dlažbě pomocí modelíny. Pod nádoby na zelené střeše byly položeny vyrovnávací podložky z dřevotřísky. Poté následovalo pravidelné vážení a měření hladiny v hodinových intervalech až do západu slunce. K odečítání výšky hladiny bylo použito posuvné měřítko s rozlišením 0,02 mm. Na dvou stanovištích byla společně s hmotností měřená také teplota vody staničním rtuťovým teploměrem (stanoviště EP7 a EP11). V pravidelných intervalech byly navíc skenovány povrchové teploty infračervenou kamerou FLIR E60 (FLIR Systems, Inc., tepelná citlivost <0,05°C). Pořízeny byly snímky výparoměrných nádob a jejich

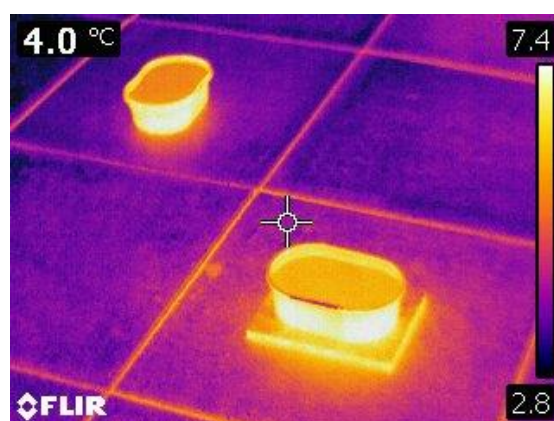
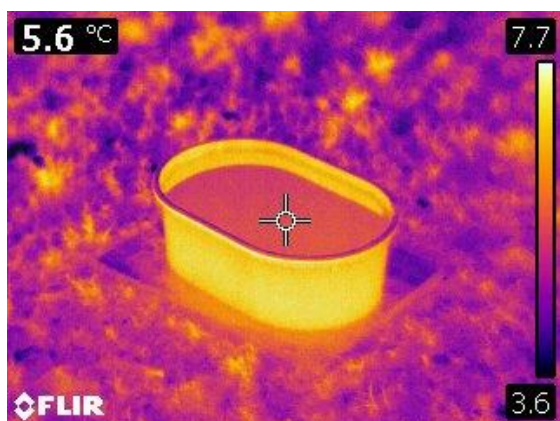
bezprostředního okolí, meteorologických sloupů, čidel a vegetace v 5:30, 8:30, 10:30, 12:30, 16:30, 19:30 a 21:00 hodin. V průběhu experimentu došlo k poškození nádoby na stanovišti EP5, proto bylo toto stanoviště z experimentu vyřazeno.



Obr. 5: Rozmístění jednotlivých stanovišť evaporačního experimentu na střeše univerzitního centra UCEEB dne 25. června 2015.



Obr. 6: Čirá plastová nádoba s vyrovnávací podložkou určená pro experiment umístěná na zelené střeše experimentálního centra UCEEB v den evaporačního experimentu.



Obr. 7: Snímky plastových nádob pořízené infračervenou kamerou FLIR E60 v den evaporačního experimentu v 5:00 SELČ. Levý snímek je pořízen na zelené střeše, snímek vpravo zachycuje nádoby na části střechy z betonových dlaždic.

## 4. Výsledky

### 4.1. Vyhodnocení evaporačního experimentu

V této části textu budou představeny výsledky z jednoho stanoviště evaporačního experimentu (EP11) provedeném dne 25. června 2015. Z naměřených hodnot hmotnosti vody byla vypočtena úroveň hladiny a z tohoto údaje byla následně určena výparná výška, intenzita evaporace a kumulativní evaporace. K výsledné tabulce jsou doplněny grafy intenzity evaporace, kumulativní evaporace a porovnání intenzity evaporace s teplotou vody a teplotou vzduchu. V závěrečné části kapitoly budou porovnány výsledky kumulativní evaporace naměřené na jednotlivých stanovištích.

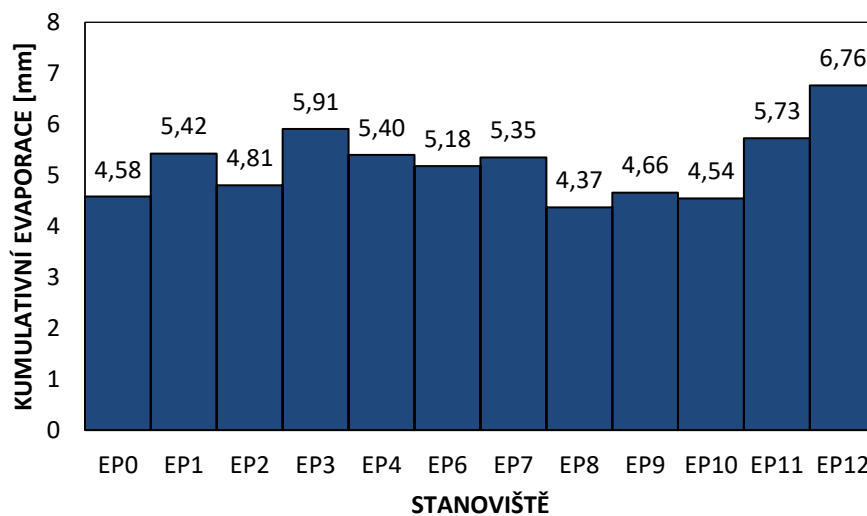
Tab. 2: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu pro stanoviště EP11 umístěného na betonové dlažbě dne 25. června 2015.

STANOVIŠTĚ EP11							
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	TEPLOTA	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	[°C]	
22:00	884,4	53,337	-	-	-	-	za tmy
4:50	882,2	53,204	-	-	0,000	-	ve stínu
6:06	881,9	53,186	0,018	0,014	0,018	9,0	ve stínu
6:53	881,2	53,144	0,042	0,054	0,060	10,0	ve stínu
8:18	879,0	52,980	0,164	0,116	0,225	14,0	na slunci
9:42	874,0	52,631	0,349	0,249	0,574	19,5	na slunci
10:26	870,1	52,396	0,235	0,320	0,808	20,5	na slunci
11:37	861,4	51,872	0,524	0,443	1,332	22,0	na slunci
12:27	854,7	51,407	0,465	0,558	1,798	24,5	na slunci
13:19	847,4	50,968	0,439	0,507	2,237	26,5	na slunci
14:29	835,2	50,163	0,804	0,689	3,041	28,0	na slunci
15:23	824,5	49,521	0,643	0,714	3,684	28,0	na slunci
16:25	814,8	49,007	0,514	0,497	4,198	26,0	na slunci
17:25	806,9	48,532	0,475	0,475	4,673	26,0	ve stínu
18:30	799,4	48,139	0,393	0,363	5,066	22,0	ve stínu
19:45	792,1	47,699	0,440	0,352	5,505	22,0	ve stínu
21:04	788,4	47,476	0,223	0,169	5,728	17,2	ve stínu

Tab. 3: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn pro stanoviště EP11 umístěného na betonové dlažbě dne 25. června 2015.

PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,239	0,353	5,728

Evaporační úhrny na jednotlivých stanovištích se pohybují v rozmezí od 4,37 do 6,76 mm. Rozdílné hodnoty jsou způsobeny rozmístěním jednotlivých nádob po zelené střeše a přilehlých plochách objektu. Vyvýšené konstrukce atik okolo zelené střechy (tj. o výšce 60 cm) a další objekty na střeše (střešní světlíky) způsobují stínění a z toho plyne různá intenzita dopadajícího slunečního záření během dne. Atiky a objekty na střeše také ovlivňují rychlost a směr proudění větru v okolí jednotlivých nádob. Výpar v jednotlivých částech zelené střechy je tak ovlivněn mnoha faktory. Mezi nejvýznamnější důvody očekávané variability patří rozdílná expozice částí střechy vůči slunci, nerovnoměrné proudění vzduchu kolem střešních konstrukcí budov a vliv heterogenity půdního substrátu společně s rozdílnou kvalitou vegetačního pokryvu. Prostorovou variabilitu společného účinku prvních dvou abiotických faktorů – oslunění/zastínění a obtékání budov vzdušnými masami – je možné zjednodušeně studovat na prostorové variabilitě výparu z volné hladiny. Biotické faktory sdružené v posledním bodě by vyžadovaly náročnější metodiku měření a jejich evaluace není předmětem této práce.



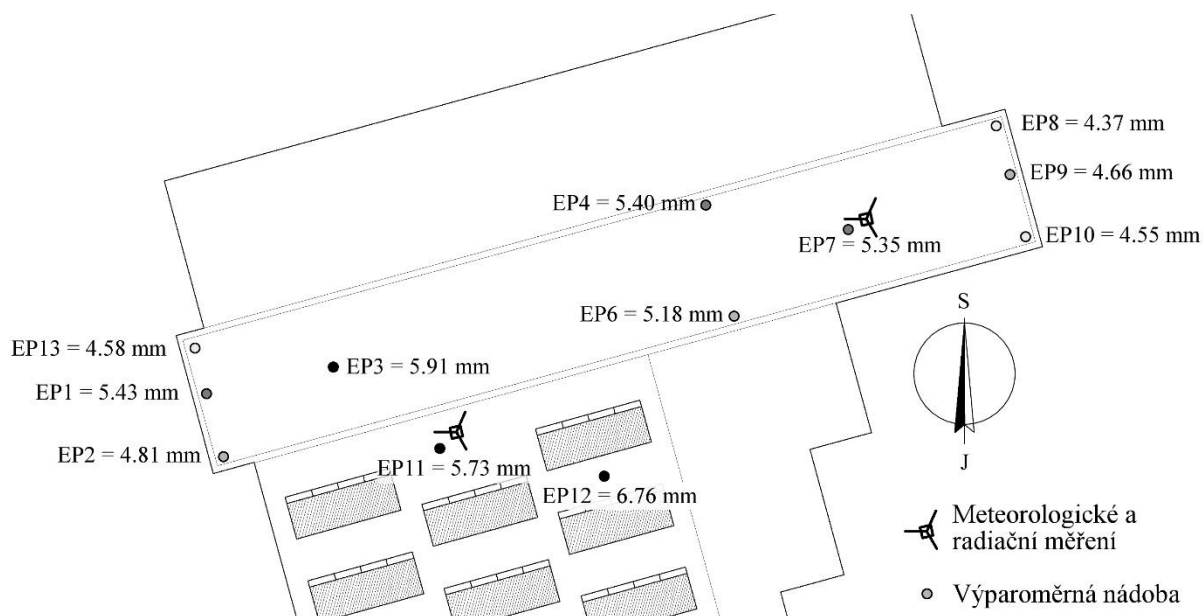
Obr. 8: Srovnání evaporačních úhrnů [mm] na jednotlivých stanovištích při evaporačním experimentu provedeném dne 25. června 2015.

Měření výparu z volné hladiny je v našem případě ovlivněno dvojím oázovým efektem (tj. nepřirozeným zvýšením hodnot výparu z důvodu ostrovního charakteru monitorovaného systému vůči okolí). Výparoměrné nádoby, s plochou o pět řádů menší než zelená střecha, jsou takovými oázami. Obdobně zelená střecha na budově UCEEB představuje vyvýšenou oázu exponovanou slunci a větru v industriálním okolí. Tato skutečnost se projevuje na meteorologických měřeních (teploty a vlhkosti vzduchu) provedených ve dvou metrech nad úrovní střechy, která nejsou ovlivněna její přítomností. V praxi se naměřené hodnoty výparu



korigují koeficientem nabývajícím hodnot v intervalu  $<0; 1>$  (nejčastěji je používána hodnota 0,7). Předpokládáme, že by byl koeficient prostorově konstantní, proto nejsou prezentované intenzity výparu a celková vypařená množství vody tímto způsobem opraveny.

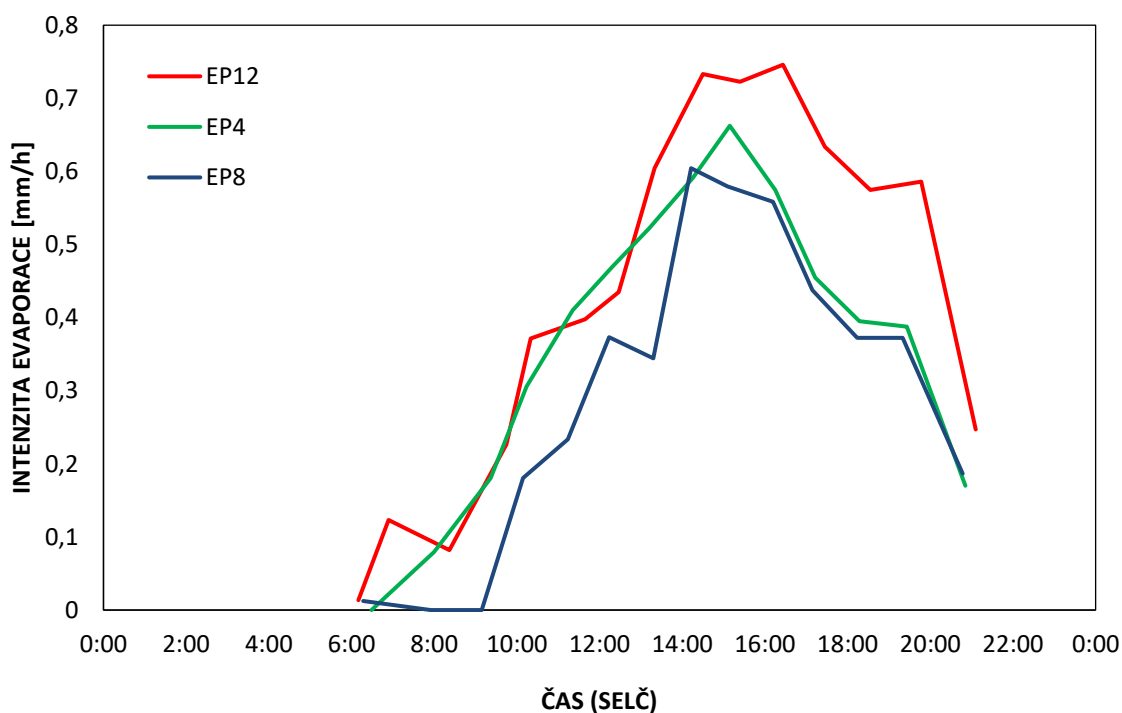
Rozdělení měření na střeše společně s naměřenými kumulativními hodnotami výparu jsou na Obr. 9. Kumulativní hodnoty výparů na zelené střeše se pohybovaly mezi 4,4 a 5,9 mm. Naproti tomu na betonové dlažbě přilehlé střeše byly naměřeny hodnoty v průměru o 1,2 mm vyšší. Ve středních částech střechy byl výpar o 7 až 17% vyšší než průměr. V rozích zelené střechy nejvíce ovlivněných atikami se celkový výpar pohyboval na úrovni 90% průměrné hodnoty pro celou střechu.



Obr. 9: Schéma evaporačních měření na zelené střeše a sousední střeše s betonovou dlažbou. U jednotlivých výparoměrných nádob jsou uvedena celková vypařená množství naměřená od úsvitu do soumraku 25. června 2015.

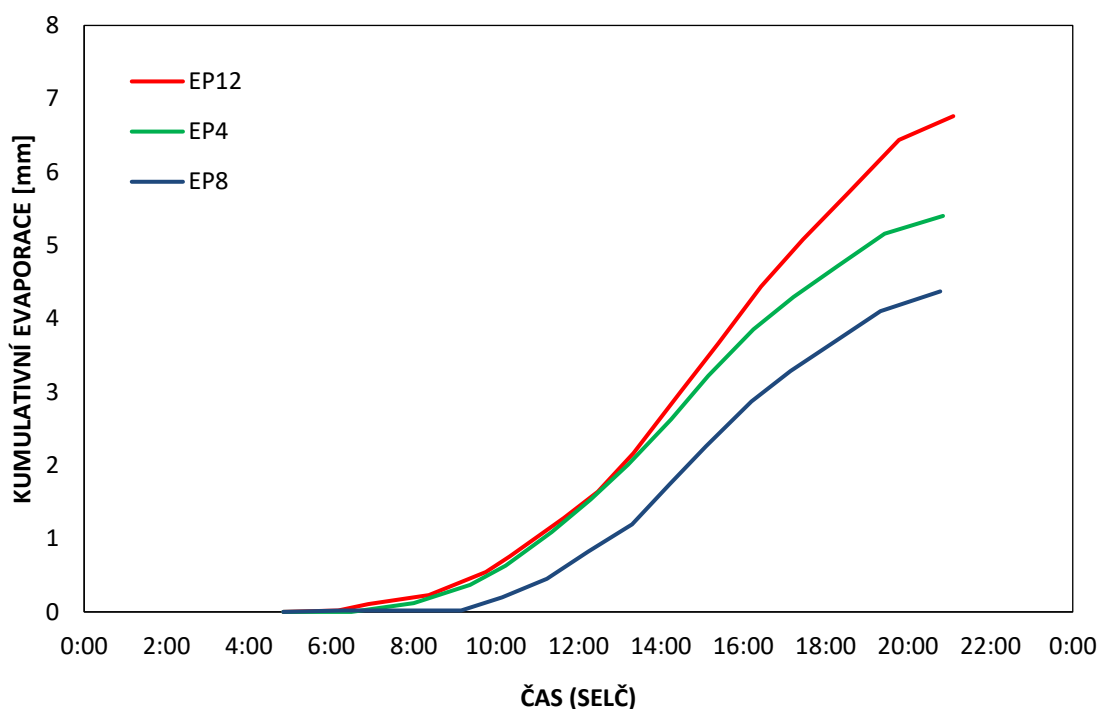
Měření ovlivněná přítomností atik mají také rozdílnou dynamiku, tj. pozdější nástup nebo dřívější snížení intenzity výparu z důvodu zastínění, v porovnání s měrnými lokalitami ve střední části zelené střechy. Důvodem pro nižší naměřené intenzity je také pravděpodobně méně efektivní odvod vodních par poblíž atik. Významný rozdíl v intenzitě výparu na zelené střeše a betonové dlažbě nastává až v odpoledních hodinách.

Na Obr. 11 je zobrazena intenzita evaporace pro stanoviště EP4, EP8 a EP12 získaná z naměřených hodnot hmotnosti vody podle Tab. 2. Stanoviště EP4 bylo umístěno ve střední části zelené střechy, kde je nejméně ovlivněné atikami. Stanoviště EP8 bylo v severovýchodním rohu zelené střechy cca 30 cm od atik a stanoviště EP12 na betonové dlažbě. Na všech stanovištích byl výparný vrchol naměřen okolo třetí hodiny odpoledne. Průběh intenzity evaporace je shodný s průběhem denní teploty, jak bude ukázáno v další části textu. Kumulativní evaporace naměřená na stanovišti EP12 byla v porovnání s ostatními stanovišti nejvyšší.



Obr. 11: Průběh intenzity výparu [mm/h] 25. června 2015 ve vybraných výparoměrných nádobách. EP12 značí intenzitu výparu měřenou v nádobě umístěné na betonové dlažbě, EP4 je ve střední části zelené střechy nejméně ovlivněné atikami a EP8 je v jejím severovýchodním rohu cca 30 cm od atik.

Kumulativní průběh evaporace pro stanoviště EP4, EP8 a EP12 zobrazený na Obr. 12 byl vytvořen z hodnot výparné výšky získaných na základě vážení vody a výpočtu úrovně hladiny podle Tab. 2, přičemž byla předpokládána lineární změna intenzity výparu mezi měřeními.



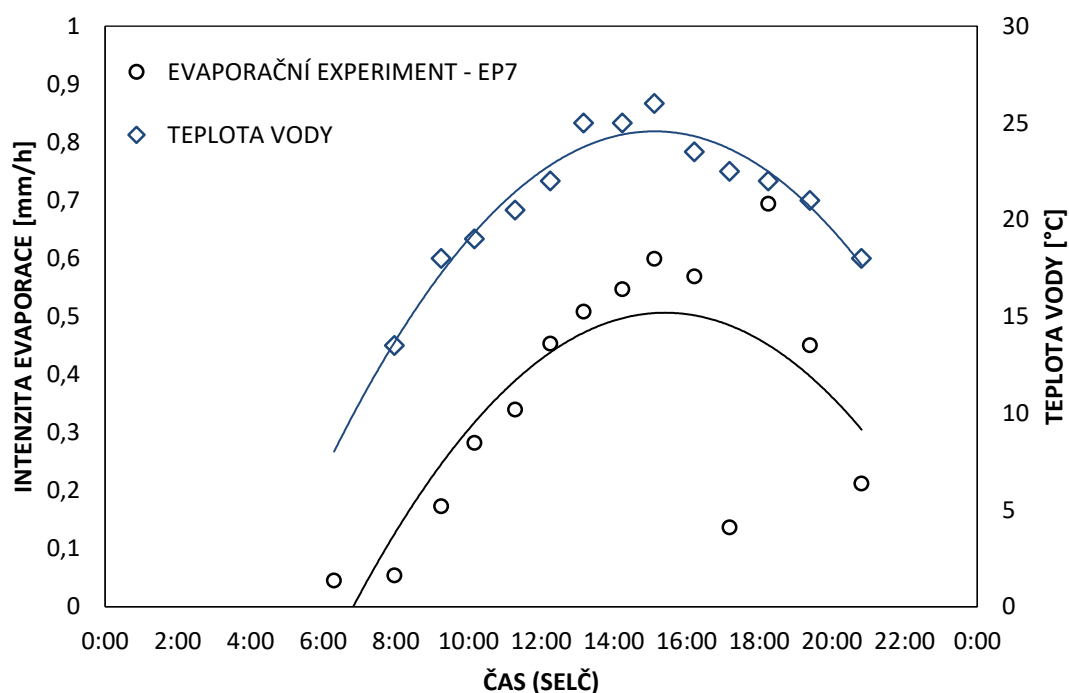
Obr. 12: Průběh intenzity výparu [m] 25. června 2015 ve vybraných výparoměrných nádobách. EP12 značí intenzitu výparu měřenou v nádobě umístěné na betonové dlažbě, EP4 je ve střední části zelené střechy nejméně ovlivněné atikami a EP8 je v jejím severovýchodním rohu cca 30 cm od atik.

Z porovnání vypočtené intenzity evaporace z vážení s naměřenou teplotou vody je patrná vysoká korelace ( $R = 0,78$  pro stanoviště EP7 a  $R = 0,86$  pro stanoviště EP11). Průběh teploty vody má stejný charakter jako průběh intenzity evaporace. S rostoucí teplotou vody vzrůstá i intenzita evaporace, jak je patrné z Obr. 13 a 14. K největšímu výparu dochází při nejvyšší teplotě vody. Vyšší teplota vody znamená vyšší energii molekul vody a tím i vyšší pravděpodobnost, že některá z nich bude mít dostatečnou energii pro změnu skupenství. Dalším faktorem ovlivňujícím intenzitu výparu je vyšší teplota vzduchu v blízké vrstvě atmosféry a tím i větší prostor pro molekuly vody ve vzduchu ve srovnání se studeným vzduchem. Kdyby ale nebyl zajištěn dostatečný odvod vodních par větrem, došlo by k nasycení vzduchu a výpar by se zpomalil nebo úplně zastavil.

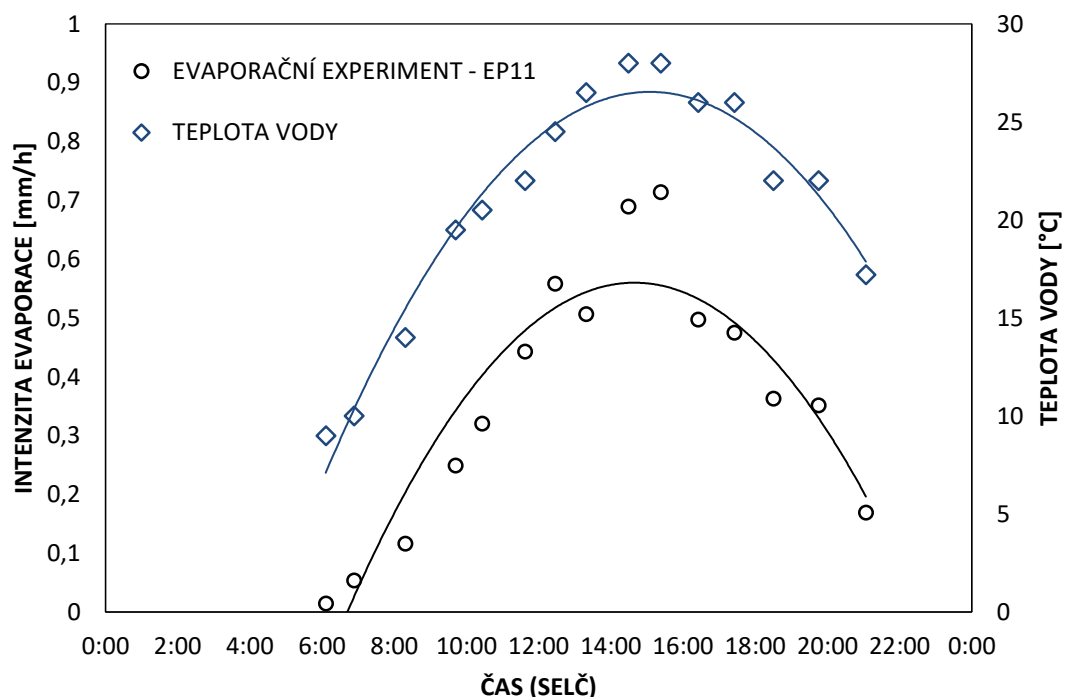
Teplota vody vzrůstá společně s rostoucí teplotou vzduchu. Maximální teplota vody byla na obou stanovištích naměřena okolo třetí hodiny odpoledne, kdy byla naměřena i nejvyšší teplota vzduchu ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ). Minimální teplota vody byla naměřena v brzkých ranních hodinách, kdy byla teplota vzduchu nejnižší ( $11,8^{\circ}\text{C}$ ). Teplota vody naměřená na stanovišti EP11 dosahuje větších hodnot oproti stanovišti EP7, ale úhrn výparu je obdobný (5,4 milimetrů pro stanoviště

EP7 a 5,7 milimetrů pro stanoviště EP11). Pravděpodobně je tomu tak z důvodu, že stanoviště EP11 bylo od 17:25 ve stínu, zatímco stanoviště EP7 bylo nezastíněno až do západu slunce ve 21:13. Intenzita evaporace tak byla od 17:25 větší pro stanoviště EP7 a celkový úhrn se vyrovnal.

Výparný vrchol je užší pro stanoviště EP11 v porovnání se stanovištěm EP7. Důvodem je strmější nárůst teploty vody na stanovišti EP11, které bylo umístěno na betonových dlaždicích akumulujících sluneční a vyzařující tepelnou energii s větší intenzitou než půdní substrát a docházelo tak k rychlejšímu ohřevu vody a tudíž ke strmějšímu růstu intenzity evaporace v porovnání se stanovištěm EP7. Voda na stanovišti EP11 na druhou stranu rychleji vychladla. Betonová dlažba má nižší tepelnou kapacitu než půdní substrát zelené střechy. To může být dalším důvodem pro rychlejší pokles intenzity evaporace na stanoviště EP11.



Obr. 13: Průběh intenzity evaporace [mm/h] v porovnání s průběhem teploty vody [°C] pro stanoviště EP7 umístěného na střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 metrů od krajů) u meteosloupu dne 25. června 2015.

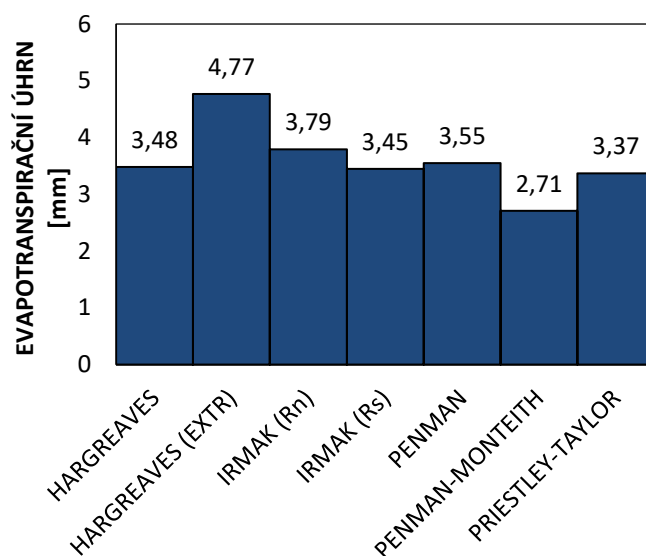


Obr. 14: Průběh intenzita evaporace [mm/h] v porovnání s průběhem teploty vody [°C] pro stanoviště EP11 umístěného na betonové dlažbě poblíž provizorního měření radiace dne 25. června 2015.

## 4.2. Vyhodnocení evapotranspirace pro den evaporačního experimentu

V této části práce budou uvedeny výsledky výpočtu hodnot evapotranspirace pro den 25. června 2015 za pomoci několika různých výpočetních metod uvedených v teoretické části práce na základě naměřených mikrometeorologických hodnot. V grafech budou porovnány výsledky jednotlivých metod a také budou porovnány výsledky evaporačního experimentu s vypočtenými hodnotami evapotranspirace. Do porovnání bude jako referenční zahrnuta Penmanova metoda. Dále bude provedeno srovnání výsledků evaporačního experimentu s průběhem čisté radiace.

Na Obr. 15 jsou porovnány výsledky jednotlivých metod pro určení intenzity evaporace na základě naměřených mikrometeorologických dat pro denní krok. Nejvyšší hodnoty intenzity evapotranspirace vycházejí z výpočtu Hargreavesovou metodou, využívající jako vstupní hodnotu extraterestriální radiaci. Tento výsledek je v porovnání s ostatními metodami nadhodnocený, a to z důvodu, že použité empirické koeficienty doporučené pro přibližnou zeměpisnou šířku  $35^\circ$  severní šířky se ukazují jako nevhodné pro naše experimentální stanoviště se zeměpisnou šířkou  $50^\circ$  severní šířky a bylo by nutné je překalibrovat. Oproti tomu Hargreavesova metoda využívající jako vstupní údaj globální radiaci poskytuje výsledek srovnatelný s ostatními metodami, nejvíce potom s Irmakovou metodou, využívající k výpočtu taktéž hodnoty globální radiace. Nejnížší hodnoty dosahuje výsledek získaný Penmanovou-Monteithovou metodou, zahrnující do výpočtu aerodynamický a povrchový odpor. Penmanova a Penmanova-Monteithova metoda je použita z důvodu, abychom zjistili, jaký rozdíl je mezi výparem z volné hladiny a výparem z vegetace, která roste na zelené střeše.



Obr. 15: Hodnoty evapotranspirace [mm] vypočtené různými metodami pro den 25. června 2015.

V Tab. 4 jsou uvedeny vstupní mikrometeorologické hodnoty použité při výpočtu intenzity evapotranspirace a kumulativní evapotranspirace Penmanovou metodou pro den 25. června 2015. Kromě mikrometeorologických měření uvedených v tabulce jsou pro výpočet dále důležité hodnoty aerodynamického odporu, hustoty vzduchu, vyčíslení psychrometrické konstanty a sklonu křivky napětí vodních par. Tučně vyznačené hodnoty značí první a poslední kladné hodnoty evapotranspirace. Kumulativní hodnota evapotranspirace vypočtená Penmanovou metodou pro hodinové kroky je větší než v případě výpočtu pro denní krok, jelikož pro hodinové kroky se nezanedbává tok tepla do půdy a jeho aproximace dle FAO56 jako v případě denního kroku. Pro denní krok se také uvažují průměrné celodenní hodnoty jednotlivých mikrometeorologických veličin. Výpočet v hodinovém kroku více zohledňuje průběh hodnot jednotlivých mikrometeorologických veličin.

Tab. 4: Vstupní mikrometeorologické hodnoty použité v Penmanově metodě a vypočtené hodinové intenzity evaporace metodou Penmana během dne 25. června 2015.

ČAS	PRŮMĚRNÁ TEPLOTA VZDUCHU	PRŮMĚRNÁ VLHKOST VZDUCHU	ČISTÁ SOLÁRNÍ RADIACE	TLAK VZDUCHU	RYCHLOST VĚTRU	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE
SELČ	[°C]	[%]	[W/m <sup>2</sup> ]	[hPa]	[m/s]	[mm/h]	[mm]
1:00	11,09	83,88	-68,117	981,00	0,82	-0,048	-
2:00	11,19	84,15	-67,362	980,95	1,82	-0,036	-
3:00	10,85	84,93	-66,120	980,93	1,85	-0,035	-
4:00	10,75	84,19	-64,723	981,00	2,05	-0,030	-
5:00	11,34	81,27	-34,669	981,00	1,95	-0,002	-
<b>6:00</b>	<b>12,89</b>	<b>76,13</b>	<b>55,653</b>	<b>981,00</b>	<b>1,11</b>	<b>0,069</b>	<b>0,069</b>
7:00	14,45	73,11	171,793	981,00	0,82	0,174	0,243
8:00	15,61	69,88	291,389	981,00	1,05	0,298	0,542
9:00	17,13	64,89	384,832	980,98	1,12	0,404	0,945
10:00	17,84	60,51	320,762	981,00	0,88	0,343	1,289
11:00	18,79	56,16	384,014	980,25	1,22	0,429	1,718
12:00	19,36	53,93	389,487	980,31	0,96	0,431	2,149
13:00	20,06	50,21	361,783	980,00	1,21	0,423	2,572
14:00	21,20	44,80	403,956	980,00	1,27	0,485	3,057
15:00	21,15	44,35	245,647	980,00	1,50	0,333	3,390
16:00	20,51	47,59	157,189	979,97	1,48	0,233	3,623
17:00	20,58	48,83	138,358	979,92	1,34	0,206	3,829
18:00	20,65	45,41	131,635	980,00	1,29	0,201	4,030
<b>19:00</b>	<b>20,22</b>	<b>45,18</b>	<b>9,487</b>	<b>979,70</b>	<b>1,02</b>	<b>0,062</b>	<b>4,091</b>
20:00	18,29	57,10	-54,884	980,00	0,47	-0,036	-
21:00	17,17	63,26	-75,547	980,00	0,24	-0,065	-
22:00	16,87	64,63	-63,992	980,00	0,50	-0,046	-
23:00	16,37	66,03	-71,901	980,00	0,62	-0,050	-
0:00	15,41	67,16	-78,650	980,00	0,74	-0,053	-

Kumulativní evaporace v případě výpočtu dle Penmanovi metody v hodinovém kroku je rovna hodnotě 4,09 mm. Hodnota evaporace vypočtena podle Penmanva v denním kroku je rovna hodnotě 3,55 mm, což je o 15% méně než v případě výpočtu v hodinovém kroku. Kumulativní výpar je ve většině případů větší v případě použití hodinového kroku.

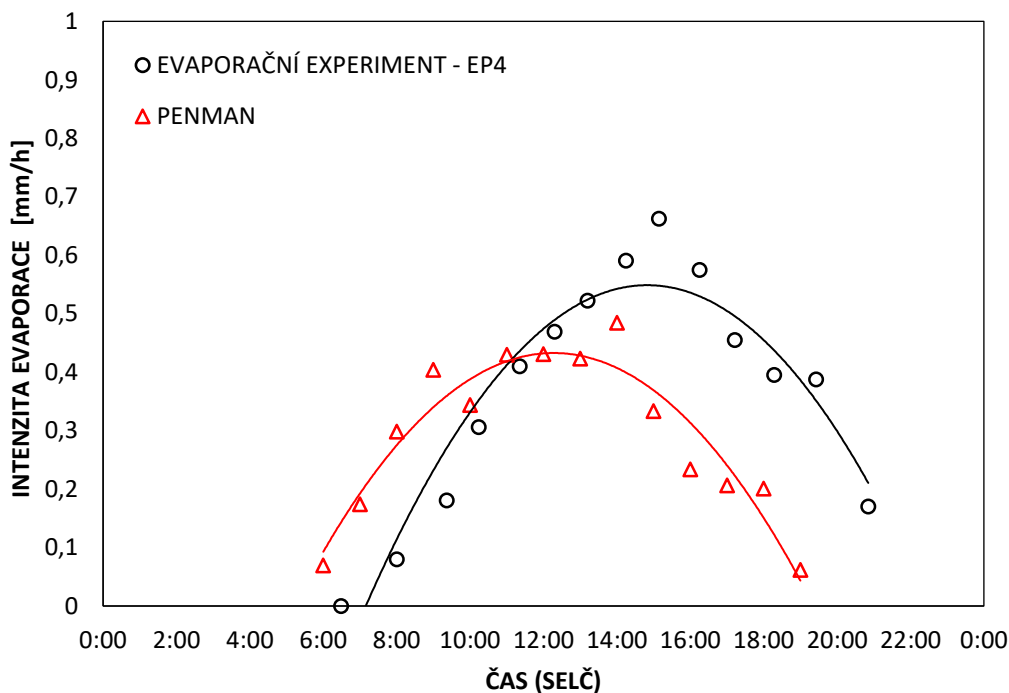


V Tab. 5 jsou uvedeny hodnoty intenzity evaporace v mm/h ze dne 25. června 2015 v hodinových krocích pro jednotlivá stanoviště a hodnoty evaporace a evapotranspirace určené Penmanovou a Penmanovou-Monteithovou metodou. Z porovnání hodnot je patrné, že v dopoledních hodinách jsou hodnoty intenzit výparu naměřené na jednotlivých stanovištích nižší než hodnoty stanovené výpočtem dle Penmana a Penmana-Monteitha. V odpoledních hodinách byly naměřené intenzity na jednotlivých stanovištích vyšší než hodnoty stanovené výpočtem. Aritmetický průměr intenzity evaporace na jednotlivých stanovištích a aritmetický průměr hodnot stanovených výpočtem je uveden pod hodnotami intenzity výparu. Procentuální vyjádření rozdílu mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami je uvedeno pod aritmetickými průměry. Hodnoty vyjadřují, o kolik procent je aritmetický průměr vypočtený z naměřených hodnot evaporace větší než aritmetický průměr hodnot získaných výpočtem dle zvolené metody. K největším rozdílům dochází na stanovištích umístěných na betonové ploše (stanoviště EP11 a EP12). Celkový aritmetický průměr hodnot intenzity evaporace naměřených na jednotlivých stanovištích je 0,359 mm/h. V porovnání s aritmetickým průměrem hodnot dle Penmana (0,287 mm/h) je rozdíl 23%. Výběrová směrodatná odchylka aritmetických průměrů hodnot výparu naměřených na jednotlivých stanovištích je 0,046 mm/h.

Tab. 5: Hodnoty intenzit evaporace naměřených na jednotlivých stanovištích dne 25. června 2015 v porovnání s intenzitami výparu stanovených výpočtem dle Penmana a Penmana-Monteitha. Ve spodní části tabulky jsou uvedeny aritmetické průměry a procentuální rozdíly aritmetických průměrů.

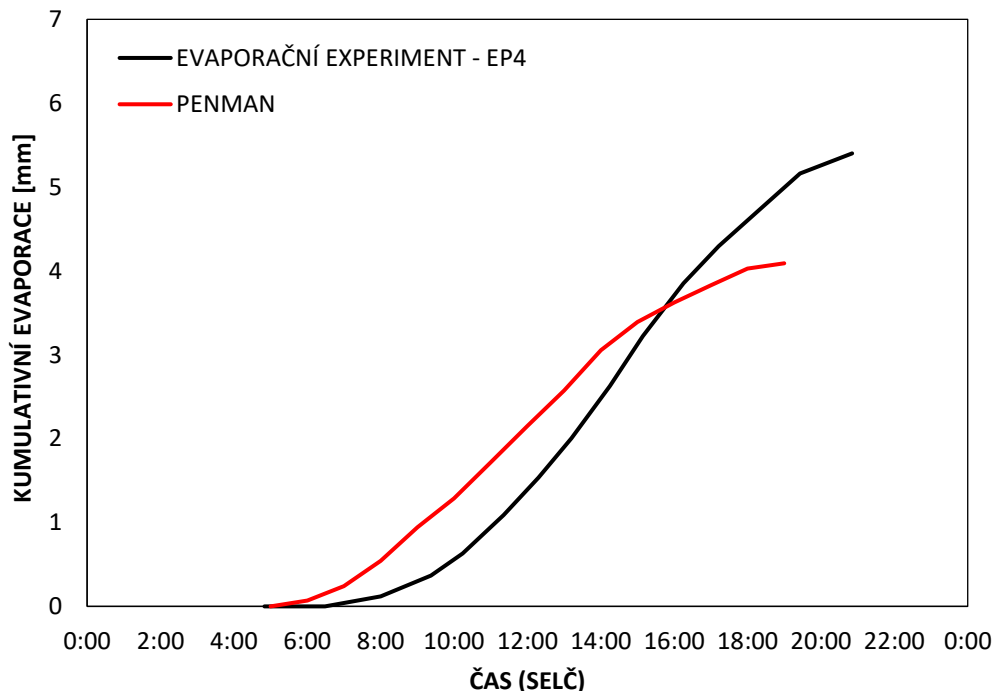
mm/h	EP0	EP1	EP2	EP3	EP4	EP6	EP7	EP8	EP9	EP10	EP11	EP12	P	PM
<b>6:00</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,069	0,058
<b>7:00</b>	0,058	0,043	0,024	0,006	0,000	0,013	0,045	0,012	0,035	0,017	0,054	0,123	0,174	0,145
<b>8:00</b>	0,020	0,108	0,075	0,072	0,079	0,061	0,054	0,000	0,002	0,000	0,116	0,082	0,298	0,242
<b>9:00</b>	0,115	0,229	0,199	0,172	0,181	0,189	0,173	0,000	0,011	0,089	0,249	0,226	0,404	0,322
<b>10:00</b>	0,686	0,361	0,306	0,318	0,306	0,340	0,282	0,181	0,192	0,230	0,320	0,372	0,343	0,290
<b>11:00</b>	0,097	0,371	0,392	0,409	0,410	0,335	0,340	0,233	0,248	0,232	0,443	0,398	0,429	0,342
<b>12:00</b>	0,342	0,526	0,368	0,466	0,469	0,426	0,454	0,373	0,397	0,390	0,558	0,435	0,431	0,362
<b>13:00</b>	0,402	0,482	0,445	0,506	0,522	0,453	0,509	0,344	0,442	0,443	0,507	0,604	0,423	0,342
<b>14:00</b>	0,534	0,606	0,566	0,962	0,591	0,579	0,547	0,604	0,519	0,497	0,689	0,733	0,485	0,396
<b>15:00</b>	0,598	0,646	0,584	0,636	0,662	0,585	0,599	0,579	0,586	0,529	0,714	0,723	0,333	0,263
<b>16:00</b>	0,506	0,550	0,484	0,561	0,575	0,565	0,569	0,558	0,580	0,517	0,497	0,746	0,233	0,188
<b>17:00</b>	0,398	0,289	0,379	0,486	0,455	0,467	0,137	0,437	0,449	0,412	0,475	0,634	0,206	0,166
<b>18:00</b>	0,333	0,539	0,384	0,373	0,395	0,356	0,694	0,372	0,361	0,367	0,363	0,575	0,201	0,166
<b>19:00</b>	0,292	0,337	0,293	0,537	0,387	0,419	0,450	0,372	0,437	0,411	0,352	0,586	0,062	0,051
<b>20:00</b>	0,159	0,125	0,114	0,168	0,170	0,193	0,213	0,187	0,223	0,219	0,169	0,247	-	-
<b>μ</b>	0,324	0,372	0,330	0,405	0,372	0,356	0,362	0,304	0,320	0,311	0,393	0,463	0,287	0,234
<b>P</b>	11,0	27,4	12,8	34,6	27,2	21,8	23,8	3,9	9,6	6,4	38,6	58,5	%	
<b>PM</b>	36,1	56,3	38,3	70,0	56,0	49,3	51,9	27,5	34,4	30,5	65,1	94,4	%	

Z porovnání výsledných hodnot intenzity evaporace získaných při evaporačním experimentu a hodnot získaných výpočtem podle Penmanovy rovnice je patrné, že k výparu dochází ve skutečnosti dříve, než podle výpočtu za pomoci Penmanovy rovnice. Dle Penmanovy rovnice probíhá výpar od šesti hodin ráno do devatenácti hodin odpoledne, kdy jsou hodnoty čisté radiace kladné. Dle experimentu ale k výparu dochází i při záporných hodnotách čisté radiace, jak je patrné i z Obr. 18. Výparný vrchol získaný Penmanovou metodou nastává přibližně ve 12:00, zatímco výparný vrchol získaný dle evaporačního experimentu nastává o tři hodiny později. Je tomu pravděpodobně z důvodu postupného ohřevu vody, kdy maximální teplota vody byla naměřena okolo třetí hodiny odpoledne. Teplota vody tak značně ovlivňuje průběh výparu a jeho vrchol.



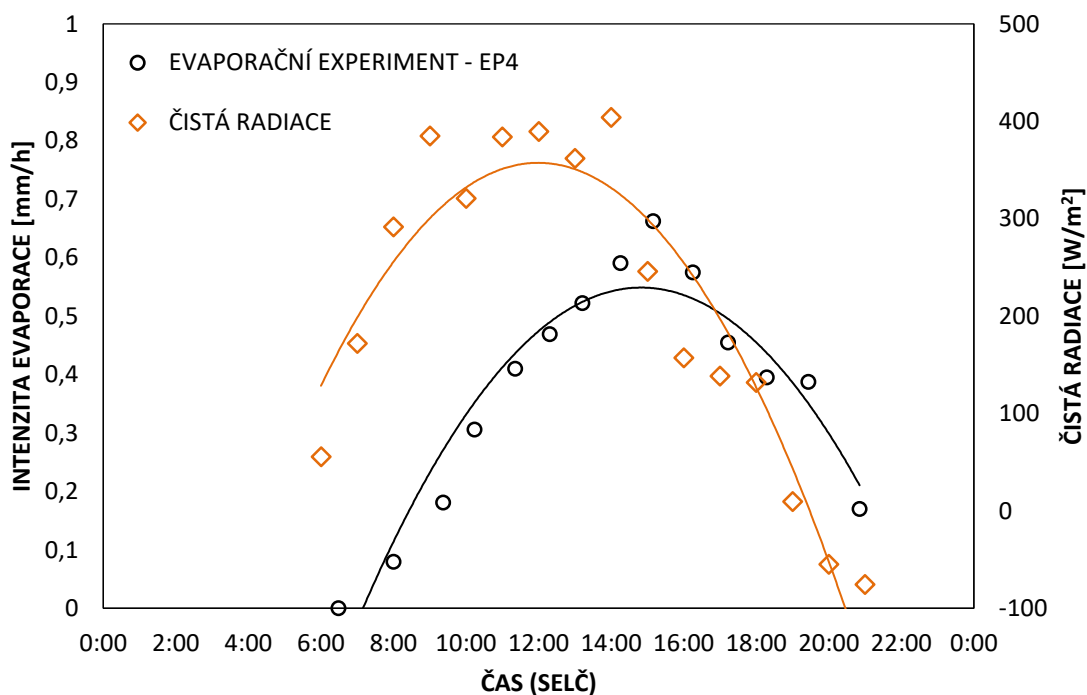
Obr. 16: Průběh intenzity evaporace [mm/h] – porovnání Penmanovy metody s evaporačním experimentem (stanoviště EP4 umístěné u severního okraje střechy) dne 25. června 2015.

Z porovnání hodnot kumulativní evaporace získané vyhodnocením evaporačního experimentu a hodnot získaných výpočtem Penmanovou metodou je patrné, že průběh kumulativní evaporace získaný Penmanovou metodou vykazuje vyšší hodnoty od prvního výpočtu v 6:00 až do 11:00, až do 16:00 je vyšší celkové vypařené množství vody (Obr. 17), po tomto čase je již měřený kumulativní výpar vyšší. Penmanova rovnice, ani další metody pro určení evaporace a evapotranspirace použité v této práci neuvažují teplotu vody. Z provedených měření vyplývá, že k ohřevu vody dochází postupně a jak vzrůstá její teplota, zvyšuje se i intenzita výparu. Voda dosáhla největší teploty okolo třetí hodiny odpoledne, poté hodnoty kumulativní evaporace začínají převyšovat hodnoty získané výpočtem dle Penmana. Z grafu je dále patrné, že k výparu dochází ve skutečnosti déle než podle výpočtu dle Penmanovy rovnice. Kumulativní evaporace je tak větší pro hodnoty získané při evaporačním experimentu. Důvod odlišnosti výsledků Penmanovy metody a měřeného výparu leží v disproporci mezi teplotou vzduchu a teplotou vody na jedné straně a kladnou radiační bilancí na straně druhé. V den experimentu jsou patrné velké difference mezi teplotou vody a vzduchu. Penman ve své rovnici nahradil teplotu výparného povrchu (vody) teplotou v jedné úrovni měření nad výparným povrchem.

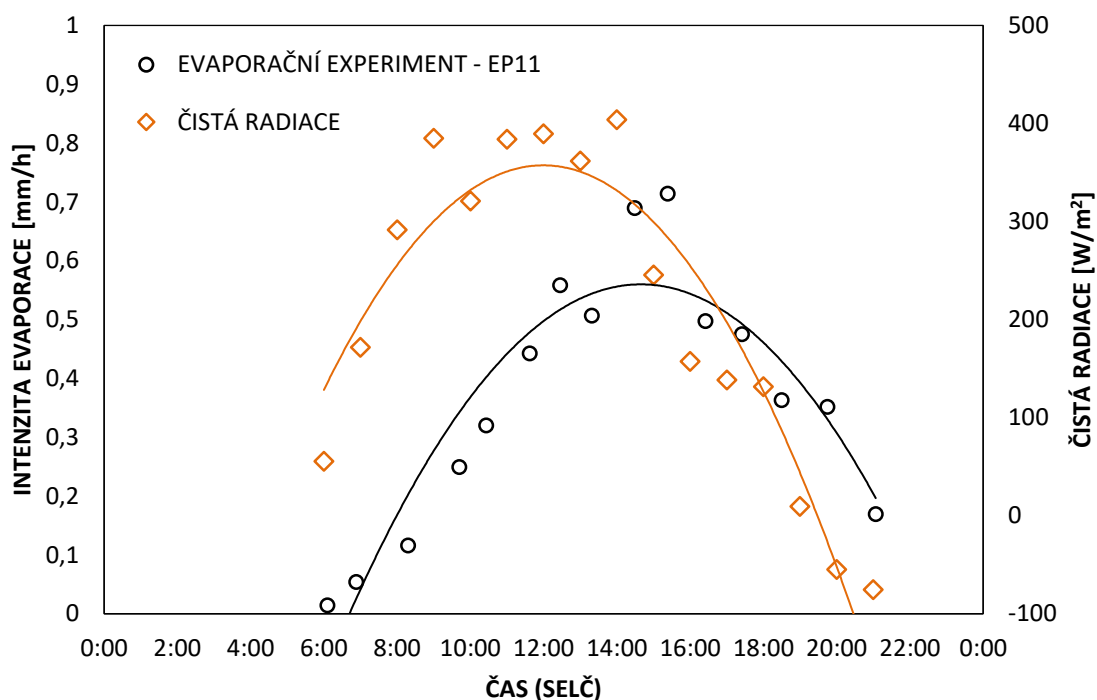


Obr. 17: Kumulativní evaporace [mm] – porovnání Penmanovy metody s evaporačním experimentem (stanoviště EP4 umístěné u severního okraje střechy) dne 25. června 2015.

Z grafu porovnání intenzity evaporace s průběhem čisté radiace je zřejmé, že výparný vrchol je posunutý oproti vrcholu čisté radiace. Krátkovlnné složky solární radiace zahřívají vodu a její teplota postupně vzrůstá. Vzhledem k tepelné setrvačnosti vody je výparný vrchol posunutý oproti vrcholu čisté radiace. Z grafu je dále patrné, že k výparu dochází i při záporných hodnotách čisté radiace. Krátkovlnné složky solární radiace jsou hybnou silou výparu, jeho průběh ale probíhá s jistým zpožděním oproti průběhu čisté radiace během dne.



Obr. 18: Porovnání měřené intenzity evaporace [mm/h] s průběhem čisté radiace [W/m<sup>2</sup>] pro stanoviště EP4 umístěného u severního okraje střechy dne 25. června 2015.

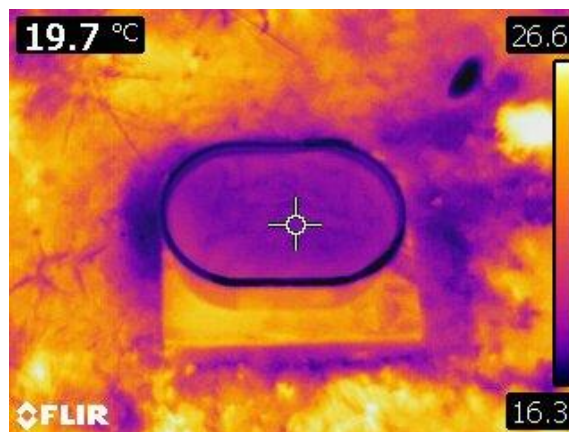


Obr. 19: Porovnání měřené intenzity evaporace [mm/h] s průběhem čisté radiace [W/m<sup>2</sup>] pro stanoviště EP11 umístěného na betonové střeše dne 25. června 2015.

Mezi hlavní faktory rozhodující o intenzitě výparu z volné hladiny patří dodávka energie pro fázový přechod a odvádění vodní páry. Tyto faktory jsou v nejpoužívanějších mikrometeorologických výpočetních metodách reprezentovány snadno měřitelnými veličinami – teplotou a čistou radiací, respektive rychlostí větru a sytostním doplňkem. Výslednice radiální bilance krátkovlnných a dlouhovlnných složek radiace na zelené střeše a betonové dlažbě přilehlé střechy se liší. Denní průměrná hodnota čisté radiace na zelené střeše je 117,14 W m<sup>-2</sup>, na střeše s betonovou dlažbou potom 83,00 W m<sup>-2</sup>. Diference je způsobena rozdílnou odrazivostí povrchu (albedem). Zatímco albedo betonové dlažby bylo na základě provedených měření odhadnuto na 0,28, odrazivost povrchu zelené střechy byla 0,16. Tato hodnota spíše než travnímu porostu odpovídá holé půdě, což dobře koresponduje se stavem vegetace na zelené střeše budovy UCEEB v červnu 2015. S ohledem na výpočet výparu některou z mikrometeorologických metod je rozdíl mezi čistou radiací na obou stanovištích (vyšší čistá radiace u zelené střechy oproti betonové dlažbě) pouze zdánlivý. Povrchem, ze kterého výpar probíhal, byla v obou případech vodní hladina, proto je možné předpokládat, že byl radiální režim nad výparoměrnými miskami ve skutečnosti totožný.

Důvod odchylky mezi zjištěnými výparnými výškami (výpar na zelené střeše je v průměru o 25% nižší než na betonové dlažbě) je nutné hledat mezi ostatními faktory ovlivňujícími intenzitu výparu, především sytostního doplnku a povrchové teploty v relevantní výškové úrovni. Měření relativní vlhkosti vzduchu v úrovni výparných ploch není bohužel k dispozici. Měřené přízemní teploty (7 cm nad povrchem) se na obou stanovištích lišily pouze minimálně. Na druhou stranu teplota vody ve výparoměrných nádobách na betonové dlažbě byla v odpoledních hodinách až o 2,5°C vyšší než v nádobě na zelené střeše.

Představu o povrchových teplotách v okolí výparoměrných nádob poskytlo infračervené snímkování. Na snímku z infračervené kamery (Obr. 4) je dobře patrná teplota vypařované vody v nádobě umístěné v severozápadním rohu zelené střechy. Bez zajímavosti není rozdíl mezi suchou trávou ve spodní části snímku, která se neochlazuje transpirací a povrchovou teplotou plevelů vpravo od výparoměrné nádoby, které se transpirací ochlazují oproti okolí až o 8°C.



Obr. 20: Snímek výparoměrné nádoby EP13 pořízený infračervenou kamerou 25. června 2015 v 11:00. V levém horním rohu trojice trsů rostoucích trav, v dolní části holá půda se suchou trávou a v pravé části tmavá oblast dobře prosperujících plevelů.

### 4.3. Vyhodnocení evapotranspirace pro vegetační období 2015 a 2016

V následující části práce bude vyhodnocena evapotranspirace na třech výše zmíněných stanovištích umístěných v areálu Univerzitního centra UCEEB pro vegetační období let 2015 a 2016. Vegetační období je pro účely této práce uvažované od 1. března do 31. října. K vyhodnocení evapotranspirace byly použity mikrometeorologické údaje získané ze tří meteorologických stanic (viz. Obr. 4). Z naměřených údajů zaznamenávaných v minutových krocích byly spočítány denní a hodinové průměry. K vyhodnocení evapotranspirace byly vybrány metody Hargreavese, Irmaka, Penmana, Penmana-Monteitha a Priestleyho-Taylorova. Cílem této části práce je porovnat výsledky evapotranspirace jednotlivých výpočetních metod a porovnat hodnoty a průběhy evapotranspirace na jednotlivých stanovištích v obou vegetačních sezónách. Jako referenční metoda pro porovnání hodnot a průběhu evapotranspirace na jednotlivých stanovištích byla vybrána metoda Penmana-Monteitha.

V Tab. 7 jsou porovnány výsledné kumulativní evapotranspirace pro vegetační sezóny 2015 a 2016 vypočtené různými metodami za použití měření ze střešní meteorologické stanice (Roof Station). Nejvyšší hodnoty pro obě vegetační sezóny nabývají úhrny vypočtené Hargreavesovou metodou využívající jako vstupní údaj hodnotu extraterestriální radiace. Nejnižší hodnoty pro obě vegetační sezóny poskytuje Priestleyho-Taylorova rovnice. Hodnoty získané Penmanovým výpočtem jsou v případě střešního stanoviště přibližně o 17,5% vyšší než hodnoty získané výpočtem dle rovnice Penmana-Monteitha. Důvodem je, že Penmanova rovnice neuvažuje povrchový odpor. Celkově byl zjištěný výpar dle většiny metod vyšší v roce 2015 než v roce 2016. Vyjímkou jsou Irmakova metoda a Priestleyho-Taylorova metoda. Obě tyto metody využívají jako vstupní údaj čistou radiaci. Průměrná čistá radiace za vegetační sezónu 2015 byla  $68,6 \text{ W/m}^2$  a  $74,5 \text{ W/m}^2$  ve vegetační sezóně 2016, tzn. vyšší v sezóně 2016 než v sezóně 2015, což odpovídá trendu u zmiňovaných metod. Obě metody jsou extrémně citlivé na vstupní údaj čisté radiace a z tohoto důvodu jsou hodnoty pro tyto metody menší pro vegetační sezónu 2015.

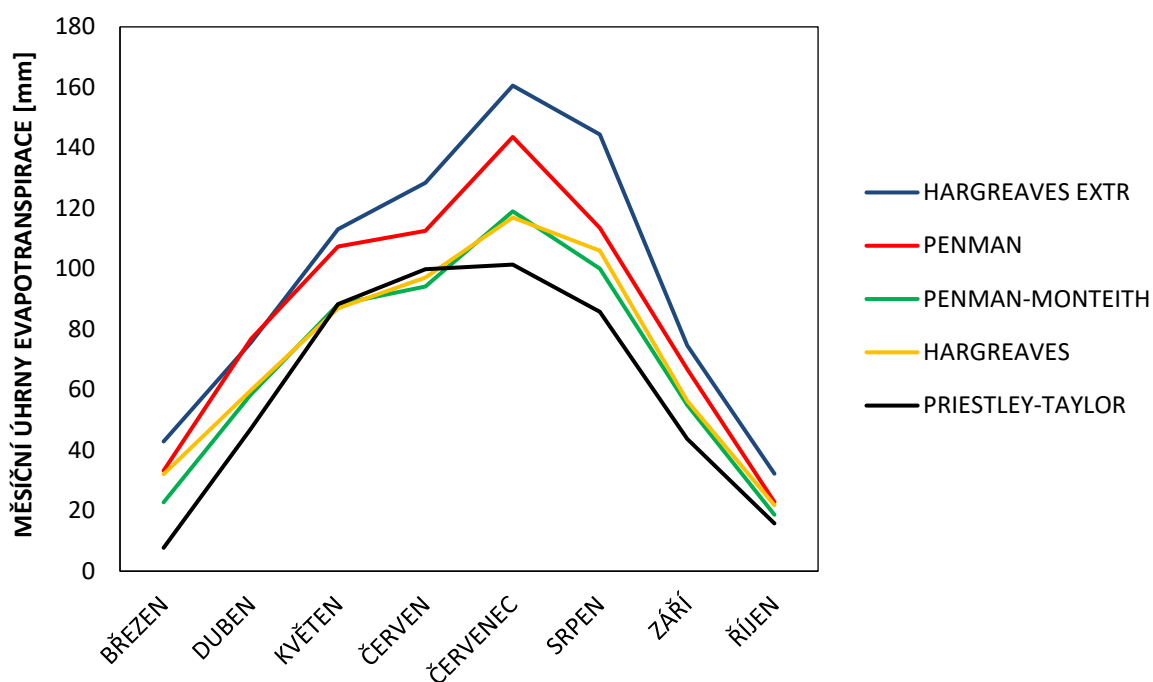
Tab. 7: Porovnání kumulativní evapotranspirace [mm] vypočtené různými metodami z mikrometeorologických dat ze stanice Roof Station pro vegetační sezóny let 2015 a 2016.

[mm]	PRIESTLEY -TAYLOR	IRMAK (R <sub>s</sub> )	IRMAK (R <sub>n</sub> )	PENMAN)	PENMAN- MONTEITH	HARGREAVES	HARGREAVES (EXTR)
<b>2015</b>	490	581	620	677	556	577	772
<b>2016</b>	523	559	655	651	538	542	743

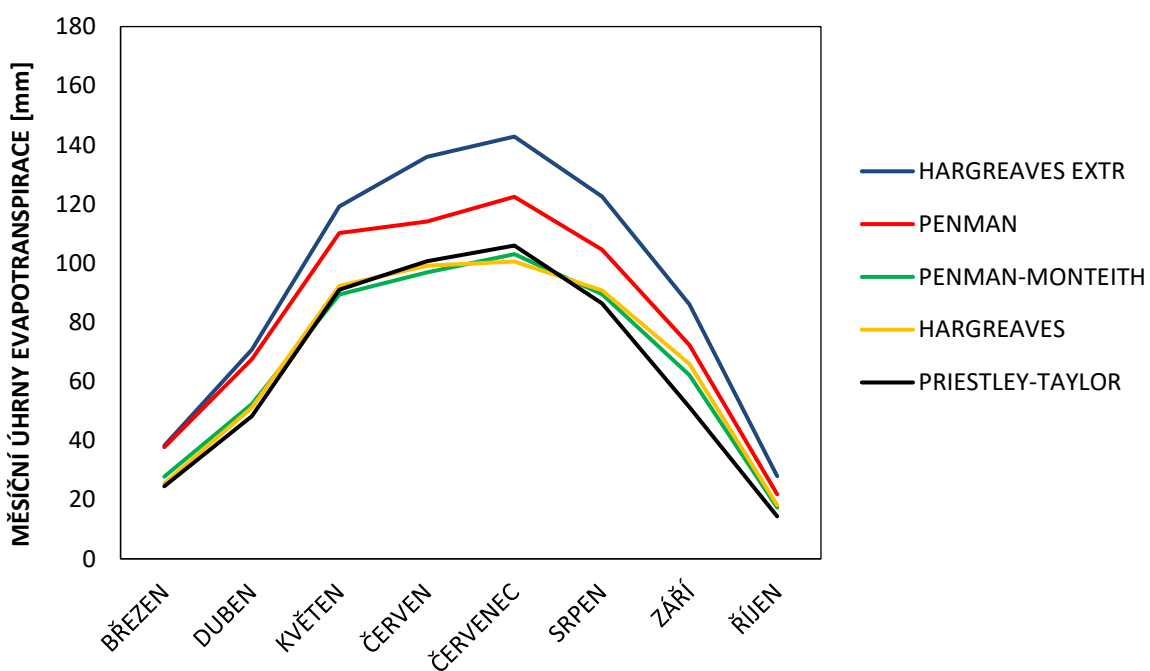
V následujících dvou grafech je porovnána kumulativní evapotranspirace vypočtená různými metodami za jednotlivé měsíce vegetační sezóny 2015 a 2016. Z grafů je patrné, že dle každé vybrané metody je největší výpar v obou vegetačních sezónách v měsíci červenci. V obou případech je také patrný velice podobný průběh výparu vypočtený podle Hargreavesovy a Penmanovy-Monteithovy metody. Penmanova a Penmanova-Monteithova metoda má podobný průběh, ale hodnoty Penmanovy metody jsou v průměru o 18% větší.

Ve vývoji měsíční evapotranspirace pro vegetační sezónu 2015 je u všech metod patrný výrazný červencový vrchol (pouze s výjimkou Priestleyho-Taylorovy metody). Ve vegetační sezóně 2016 k tomuto rozdílu nedochází. Důvodem je rozdílnost fyzikální podstaty jednotlivých metod a jejich rozdílná citlivost na mikrometeorologické údaje. V případě metody Priestleyho-Taylorova je aerodynamická složka výparu odhadnuta na 30%. Tento předpoklad je nejhůře splněn pro červen ve vegetační sezóně 2015, kdy z naměřených mikrometeorologických dat pro tento měsíc je patrná poměrně nízká průměrná vlhkost vzduchu a vysoká průměrná rychlost větru. Hodnoty těchto dvou mikrometeorologických veličin tak způsobují, že oproti jiným metodám Priestleyho-Taylorova metoda udává výrazně nižší hodnotu evapotranspirace pro měsíc červen. V měsíci červnu ve vegetační sezóně 2016 k tomuto výkyvu mikrometeorologických hodnot již nedochází a průběh evapotranspirace je podobnější.



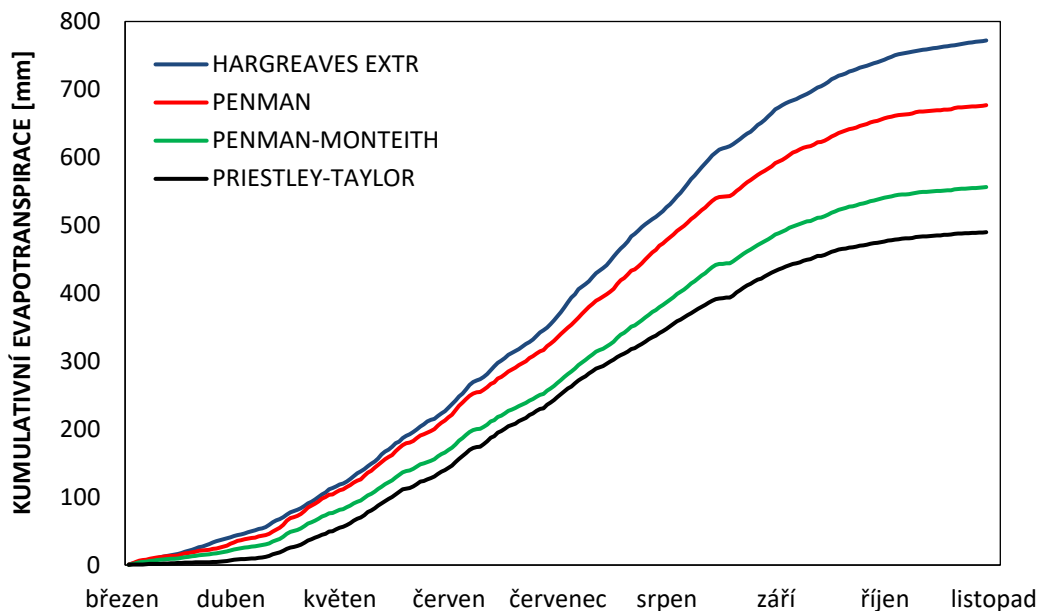


Obr. 21: Měsíční úhrny evapotranspirace [mm] vypočtené různými metodami za jednotlivé měsíce z mikrometeorologických dat ze stanice Roof Station pro vegetační sezónu 2015.

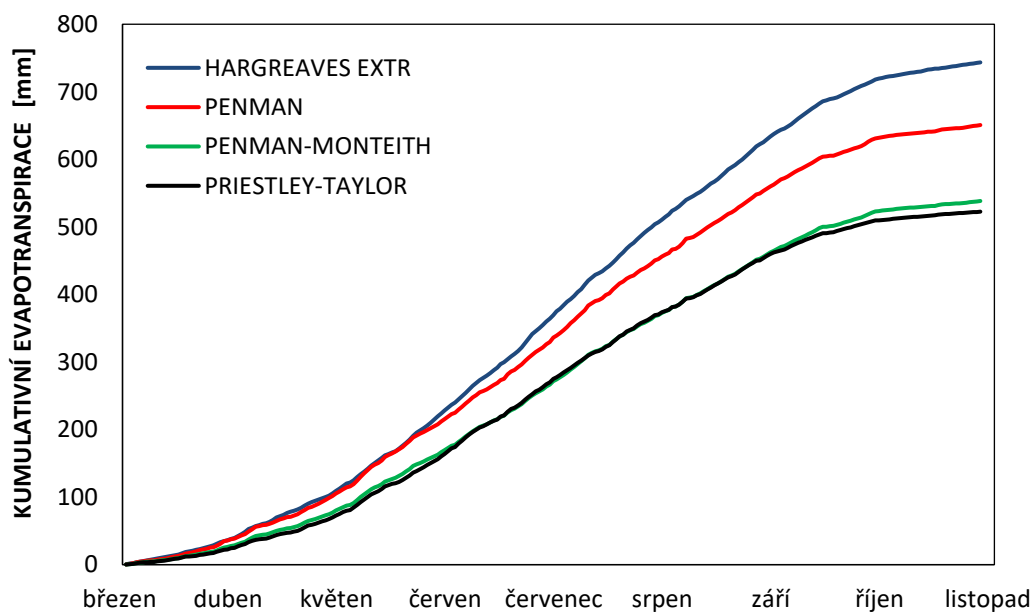


Obr. 22: Měsíční úhrny evapotranspirace [mm] vypočtené různými metodami za jednotlivé měsíce z mikrometeorologických dat ze stanice Roof Station pro vegetační sezónu 2016.

Průběhy kumulativních evapotranspirací vypočtených různými metodami v jednotlivých vegetačních sezónách jsou zobrazeny v následujících dvou grafech. Ve vegetační sezóně 2016 je průběh kumulativní evapotranspirace získaný výpočtem z Penmanovy-Monteithovy rovnice téměř identický s Priestleyho-Taylorovu metodou.



Obr. 21: Porovnání průběhů kumulativní evapotranspirace [mm] vypočtených různými metodami z mikrometeorologických dat ze stanice Roof Station za vegetační sezónu 2015.



Obr. 22: Porovnání průběhů kumulativní evapotranspirace [mm] vypočtených různými metodami z mikrometeorologických dat ze stanice Roof Station za vegetační sezónu 2016.

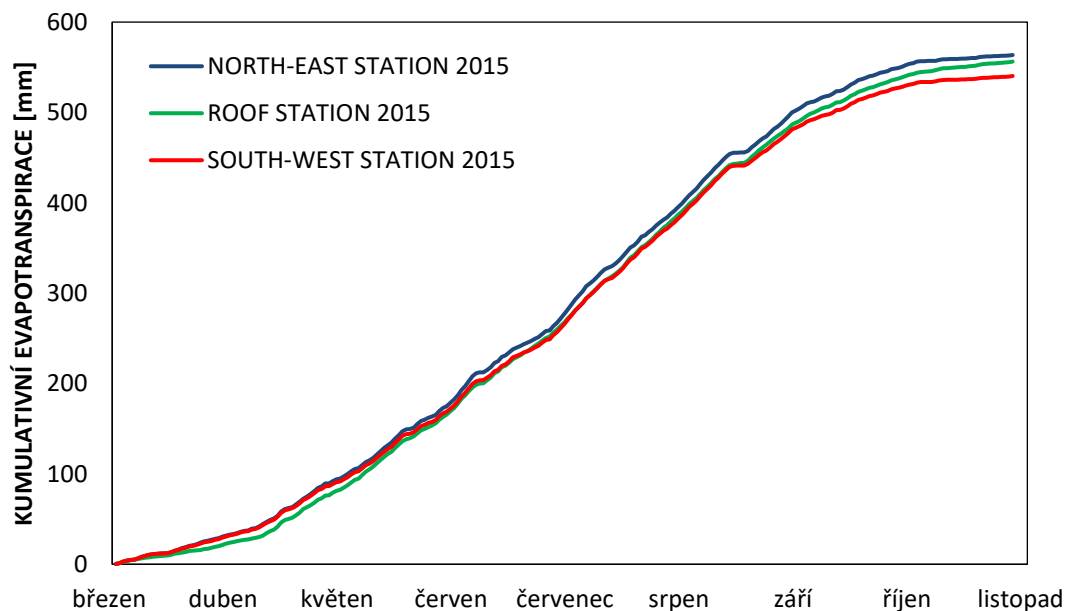
V Tab. 8 jsou navíc uvedeny průměrné hodnoty mikrometeorologických veličin pro jednotlivé měsíce vegetační sezóny 2015 a 2016. Dle Obr. 21 a 21 byl největší měsíční úhrn evapotranspirace naměřený v obou vegetačních sezónách v měsíci červenci. Největší průměrná teplota a nejnižší průměrná vlhkost vzduchu byla naměřena právě v měsíci červenci, a to v obou vegetačních sezónách. Naproti tomu největší průměrné hodnoty čisté radiace byly naměřeny v obou vegetačních sezónách v měsíci červnu. Z Obr. 21 je také patrný větší rozdíl kumulativní evapotranspirace za měsíc červen a červenec za vegetační sezónu 2015 oproti rozdílu za měsíc červen a červenec ve vegetační sezóně 2016. Je tomu tak pravděpodobně kvůli teplotnímu rozdílu mezi jednotlivými měsíci. V sezóně 2015 byl měsíc červenec teplejší v průměru o 4,4°C než měsíc červen, zatímco v sezóně 2016 byl měsíc červenec teplejší v průměru jen o 1,7°C než měsíc červen. To potvrzuje domněnku z předchozího textu, že pro intenzitu výparu je důležitější teplota vzduchu než hodnoty čisté radiace.

Tab. 8: Tabulka průměrných hodnot mikrometeorologických veličin z meteorologické stanice Roof Station pro jednotlivé měsíce vegetačních sezón 2015 a 2016.

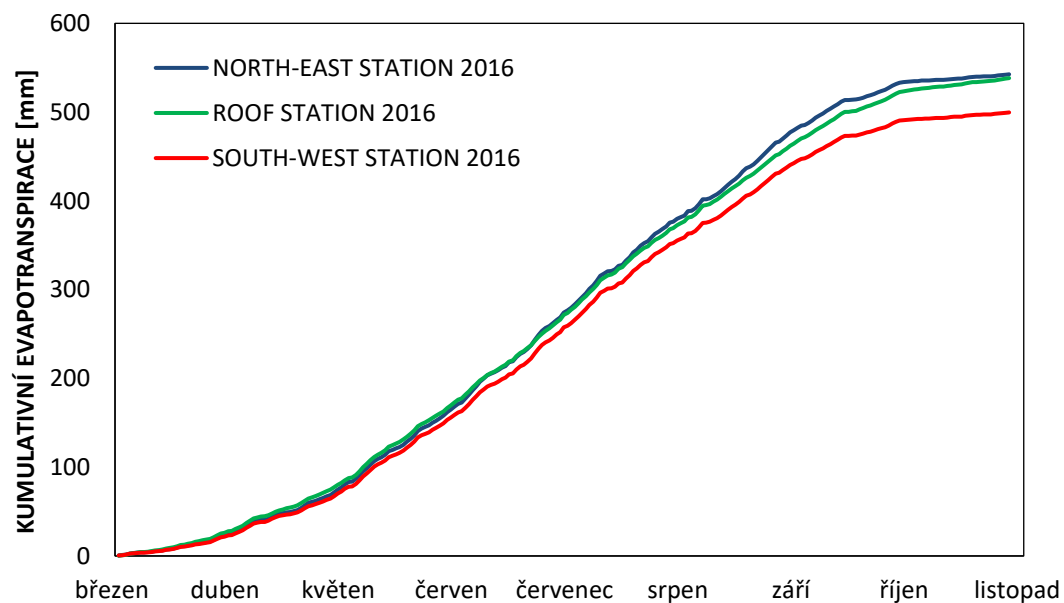
	PRŮMĚRNÁ TEPLOTA VZDUCHU		PRŮMĚRNÁ VLHKOST VZDUCHU		PRŮMĚRNÝ TLAK VZDUCHU		PRŮMĚRNÁ ČISTÁ RADIACE		PRŮMĚRNÁ RYCHLOST VĚTRU	
	[°C]		[%]		[hPa]		[W/m <sup>2</sup> ]		[m/s]	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
<b>BŘEZEN</b>	4,3	3,9	72,2	80,5	975,9	971,0	11,6	37,1	2,3	2,0
<b>DUBEN</b>	9,0	8,7	65,0	68,3	975,6	969,7	62,6	67,3	2,2	1,9
<b>KVĚTEN</b>	15,2	15,3	66,0	68,7	973,0	970,9	102,1	103,2	1,8	1,9
<b>ČERVEN</b>	17,7	18,9	69,7	72,0	975,8	971,3	112,5	10,1	1,8	1,7
<b>ČERVENEC</b>	22,1	20,6	57,2	66,6	972,9	974,3	103,2	117,2	2,1	1,9
<b>SRPEN</b>	20,3	19,5	59,5	67,5	973,6	976,8	85,8	91,6	1,5	1,6
<b>ZÁŘÍ</b>	15,8	18,9	70,5	68,8	975,2	975,8	51,0	56,8	1,8	1,5
<b>ŘÍJEN</b>	7,9	8,1	85,6	88,2	976,2	977,3	22,0	19,7	1,4	1,6

Na Obr. 23 a 24 je porovnána kumulativní evapotranspirace vypočtená Penmanovou-Monteithovou metodou pro tři stanoviště za vegetační sezóny 2015 a 2016. V obou případech je kumulativní evapotranspirace nejvyšší pro stanoviště North-East, umístěného severovýchodně od budovy. Ve vegetační sezóně 2015 i 2016 byly největší průměrné hodnoty čisté radiace a nejvyšší průměrné maximální teploty vzduchu naměřeny právě pro toto stanoviště. Na výslednou hodnotu celkové evapotranspirace má také vliv rozdílný charakter proudění vzduchu na jednotlivých stanovištích a také různé druhy povrchu v okolí jednotlivých

meteorologických stanic mající rozdílné albedo a tepelnou kapacitu. To je pravděpodobně důvodem, proč se výrazně vyděluje stanoviště South-West, které má v obou sezónách v průměru o 6% nižší úhrn evapotranspirace ve srovnání se stanovištěm North-East.



Obr. 23: Porovnání kumulativní evapotranspirace [mm] vypočtené Penmanovou-Monteithovou metodou pro tři meteorologické stanice za vegetační sezónu 2015.



Obr. 24: Porovnání kumulativní evapotranspirace [mm] vypočtené Penmanovou-Monteithovou metodou pro tři meteorologické stanice za vegetační sezónu 2016.

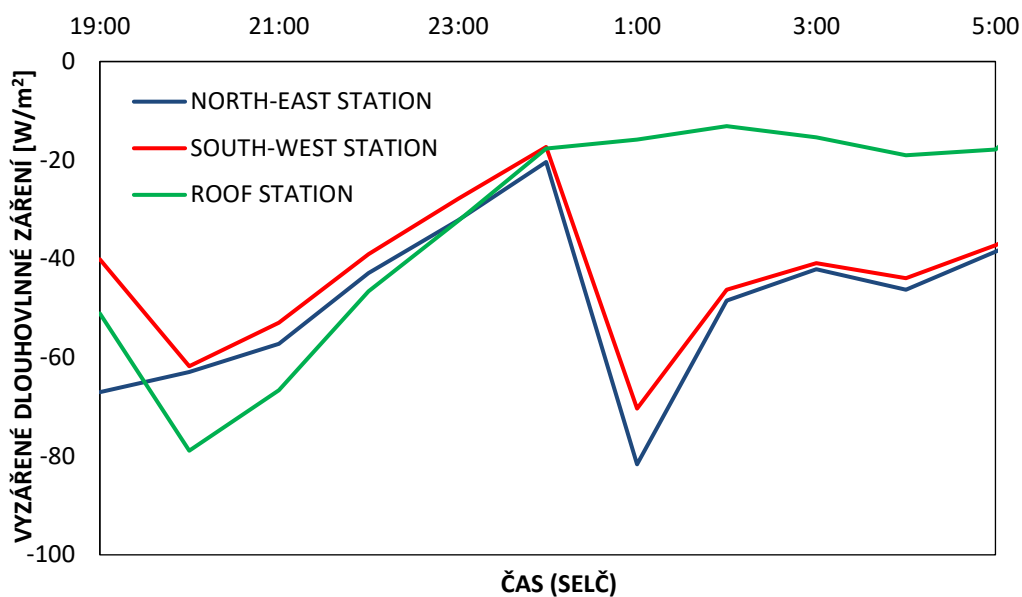
Intenzita slunečního záření má významný vliv na výslednou hodnotu evapotranspirace. Ve většině výpočetních vzorců sloužících pro určení hodnoty výparné výšky se vyskytuje některá forma slunečního záření. V případě Penmanovy-Monteithovy rovnice se jedná o hodnotu čisté radiace. Čistá radiace je výsledkem bilance krátkovlnného a dlouhovlnného záření v úrovni výparného povrchu. Na základě dat získaných z meteorologických stanic na jednotlivých stanovištích můžeme určit jak hodnotu čisté solární radiace, tak i hodnoty dopadajícího a odraženého krátkovlnného a dlouhovlnného záření. Stanice Roof Station je vybavena radiometrem měřícím všechny složky záření, stanice South-West a North-East měří pouze přímo hodnoty čisté solární radiace.

Dosažením do bilanční rovnice (5) byly získány hodnoty celkového odraženého a vyzářeného záření pro všechny stanice. Hodnoty dopadajícího krátkovlnného a dlouhovlnného záření ze stanice Roof Station byly použity při výpočtu hodnoty celkového odraženého a vyzářeného záření na stanicích South-West a North-East. Meteorologické stanice jsou umístěné na třech typech povrchů – betonový povrch, trávník na rostlém terénu a zelená střecha z větší části pokrytá pouze půdním substrátem malé mocnosti. Výsledné hodnoty nám poskytují možnost hodnotit celkovou velikost odraženého a vyzářeného záření v závislosti na typu povrchu. Porovnáním průběhu celkového odraženého a vyzářeného záření na jednotlivých stanovištích s průběhem meteorologických veličin bude v následující části práce zkoumáno, zda je mezi těmito parametry závislost. V případě této práce zaměřené na zkoumání vlastností různých vegetačních povrchů je nejzajímavější hodnota dlouhovlnného (tepelného) vyzářeného záření.

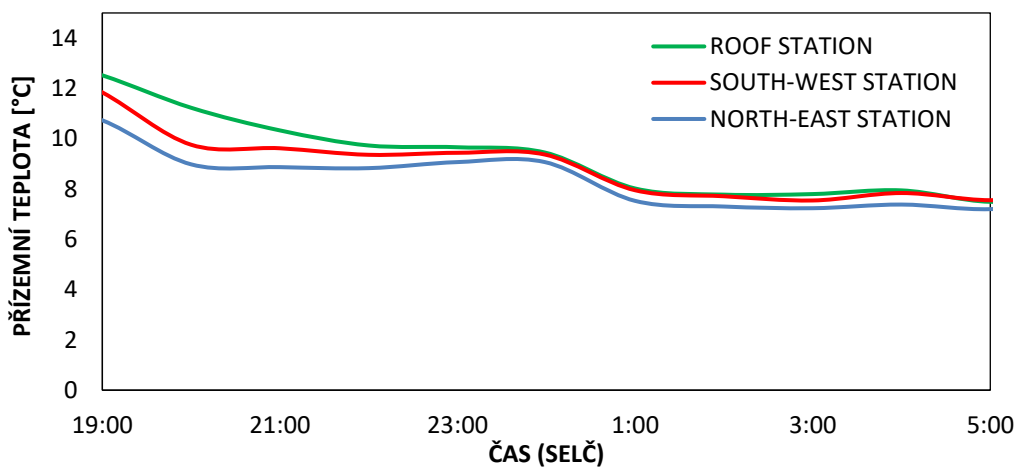
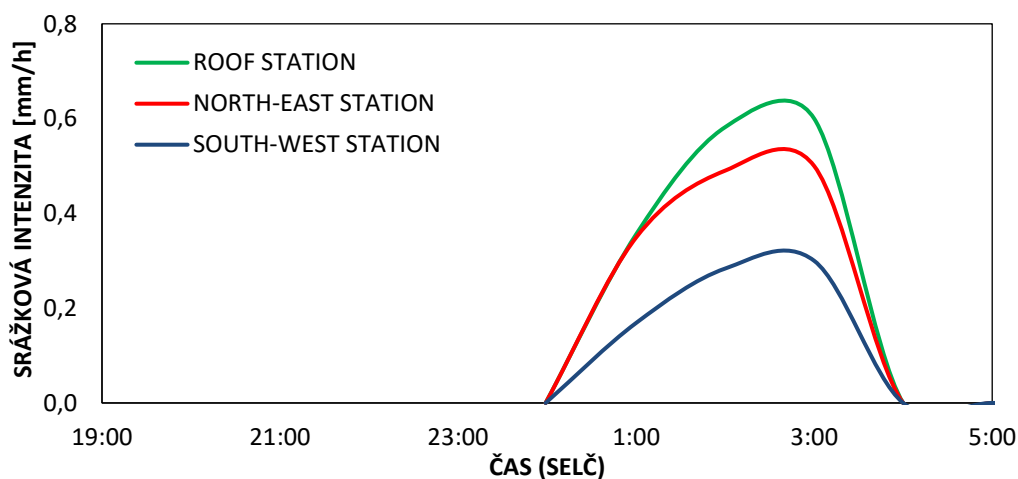
Měření jednotlivých složek záření a čisté radiace na stanovištích probíhalo v minutovém kroku. Abychom z celkové odražené a vyzářené radiace mohli samostatně vyjádřit hodnotu dlouhovlnného vyzářeného záření, průběh záření bude porovnáván pro hodiny, kdy hodnota čisté solární radiace je záporná. Dopadající krátkovlnné a odražené krátkovlnné záření je v tuto část dne rovno nule. Hodnota dopadajícího dlouhovlnného záření je známa. Hodnota vyzářené dlouhovlnné radiace se získá dosažením do bilanční rovnice. Na základě tohoto předpokladu může být porovnáno chování jednotlivých povrchů. Průběh vyzářené dlouhovlnné radiace byl porovnán s průběhem průměrné teploty a vlhkosti vzduchu, přízemní teploty, rychlosti větru a srážkového úhrnu. Z porovnání bylo zjištěno, že z pozorovaných meteorologických veličin mají na průběh a hodnotu vyzářeného dlouhovlnného záření hlavní vliv srážky, tedy zamokření povrchu. Průběh hodnot ostatních měřených veličin nijak výrazně nekorespondoval s průběhem

hodnot vyzářeného dlouhovlnného záření. Nejvyšších hodnot dosahovala rychlost větru na stanici Roof Station, nejnižší rychlosti větru byly ve většině případů naměřeny na stanici North-East. I když byly rozdíly v hodnotách rychlostí větru na jednotlivých stanovištích v některých dnech poměrně výrazné, charakter průběhu celkového odraženého záření zůstal pro každý den stejný, a tak se tento rozdíl projevil jenom v mírném zvýšení hodnoty vyzářeného dlouhovlnného záření, ale na žádném stanovišti se neprojevil změnou charakteru průběhu tohoto záření.

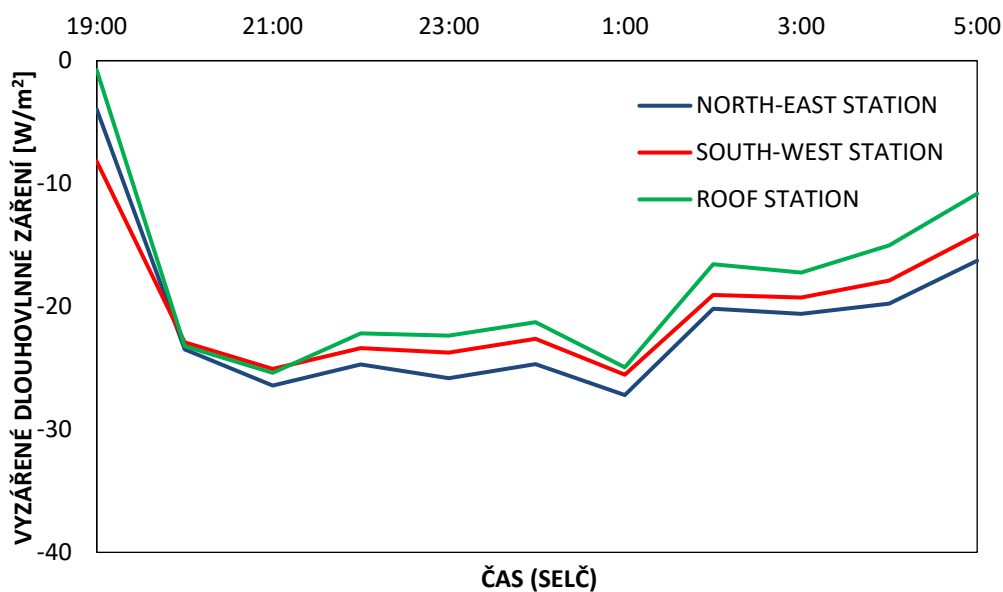
Tři charakteristické dny z měsíce května byly vybrány pro porovnání – dny s nízkou a vysokou srážkovou intenzitou a den beze srážek. V následujících grafech je zobrazen průběh vyzářeného dlouhovlnného záření, průběh přízemní teploty a průběh srážek na třech stanovištích pro jednotlivé dny.



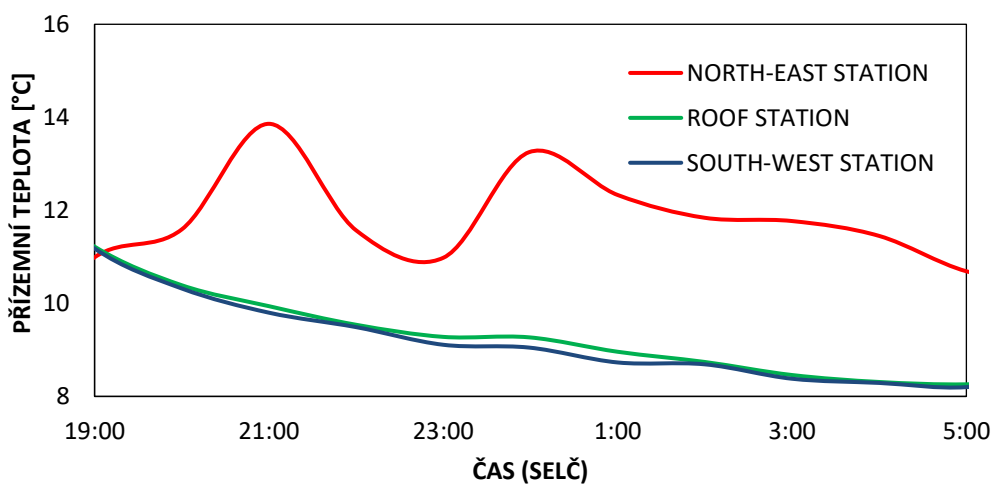
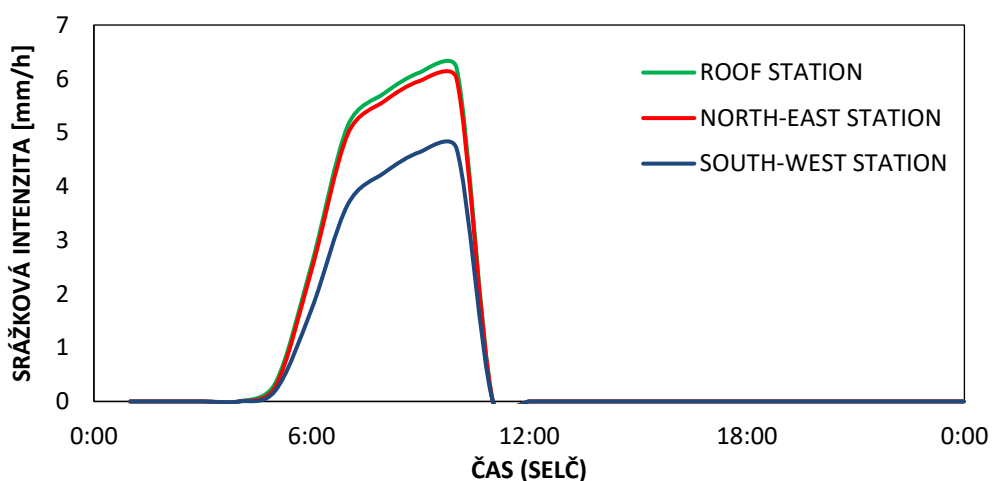
Obr. 25: Porovnání průběhu vyzářeného dlouhodobného záření [W/m<sup>2</sup>] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 30. dubna a 1. května 2015.



Obr. 26: Porovnání průběhu srážkové intenzity [mm/h] a přizemní teploty [°C] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 30. dubna a 1. května 2015.

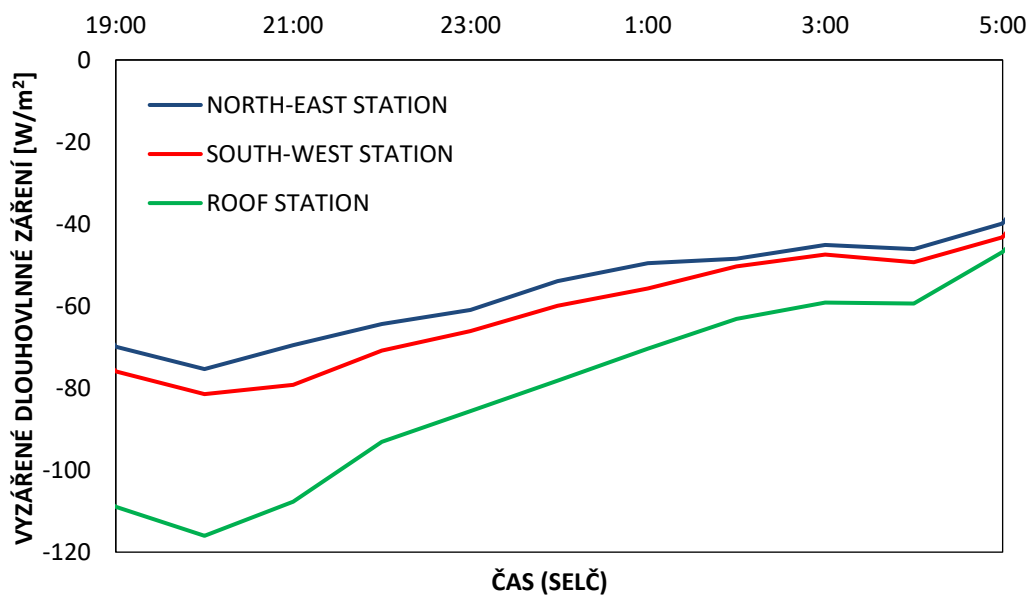


Obr. 27: Porovnání průběhu vyzářeného dlouhovlnného záření [W/m<sup>2</sup>] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 26. a 27. května 2015.

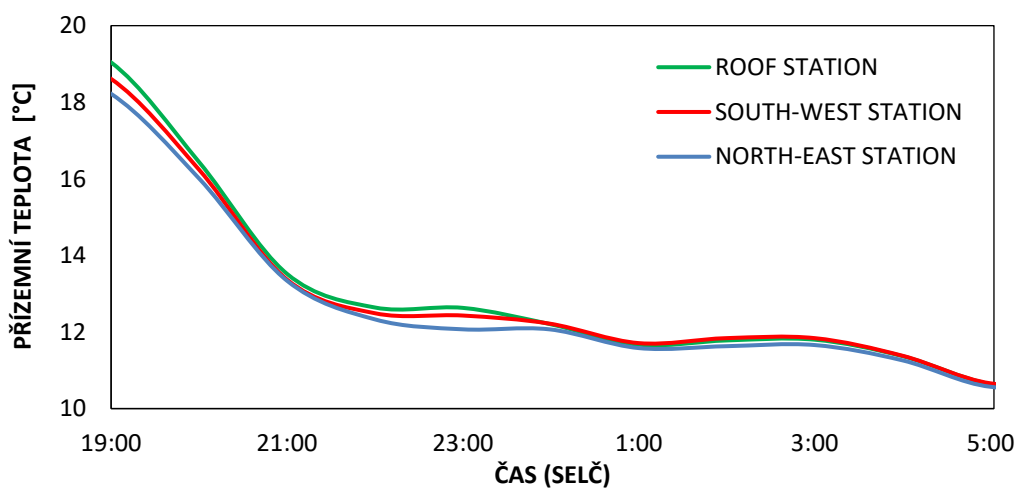


Obr. 28: Porovnání průběhu srážkové intenzity [mm/h] a přízemní teploty [°C] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 26. a 27. května 2015.





Obr. 29: Porovnání průběhu celkového odraženého záření [W/m<sup>2</sup>] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 16. a 17. května 2015.



Obr. 30: Porovnání průběhu přizemní teploty [°C] pro tři meteorologické stanice v nočních a ranních hodinách mezi dny 16. a 17. května 2015

Srážky a jejich intenzita významně ovlivňují hodnotu vyzářené dlouhovlnné radiace. Srážky o nižší intenzitě způsobují rychlý nárůst hodnoty vyzářeného dlouhovlnného záření na stanovištích North-East a South-West, tedy na stanovištích, kde je v prvním případě travnatý povrch a v druhém zatravněné betonové dlaždice. U těchto povrchů se dá očekávat, že i v případě srážky o nižší intenzitě dochází k tvorbě vrstvy vody, která způsobuje změny v intenzitě vyzařování. V případě stanoviště Roof Station, kde se nachází převážně půdní substrát, k žádné změně průběhu vyzářeného dlouhovlnného záření. Půdní substrát vodu do určitého času absorbuje, aniž by došlo ke změně parametrů, které ovlivňují hodnotu vyzářeného dlouhovlnného záření. V případě déle trvající srážky nebo srážky o vysoké intenzitě je průběh vyzářené dlouhovlnné radiace pro všechna stanoviště téměř identický. V tomto případě je půdní substrát nasáklý vodou, mohou se tvořit menší vodní plochy a podmínky pro vyzařování jsou tak téměř identické na všech stanovištích.

V den bez srážek se počáteční stav střechy a okolních stanic výrazně liší. Charakter průběhu vyzářené dlouhovlnné radiace je podobný pro všechna stanoviště. V průběhu noci se hodnoty vyzářené dlouhovlnné radiace na všech stanovištích snižují a v době před východem slunce se hodnoty na všech stanovištích pohybují v rozmezí  $10 \text{ W/m}^2$ . Nejvyšší hodnoty vyzářené dlouhovlnné radiace byly naměřeny na stanovišti Roof Station. Nejmenší hodnoty potom byly naměřeny na stanovišti North-East. Hodnoty naměřené na stanovištích North-East a South-West nabývají podobných hodnot v rozmezí  $10 \text{ W/m}^2$ . Z vybraných dnů je tento den jediný, kdy dlouhovlnné vyzářené záření je na střeše po celou dobu noci souvisle větší než na okolních stanicích.

Z výsledků je patrné, že hodnoty vyzářené dlouhovlnné radiace jsou v případě půdního substrátu, který není zamokřen, vyšší než u zatravněné plochy a betonových dlaždic. Půdní substrát oproti vegetaci a betonové ploše nereaguje na menší zamokření okamžitou změnou hodnoty vyzářené dlouhovlnné radiace. V případě vyrovnání vlhkostních podmínek je charakter průběhu a hodnota vyzářeného dlouhovlnné záření podobná pro všechny vybrané typy povrchů.

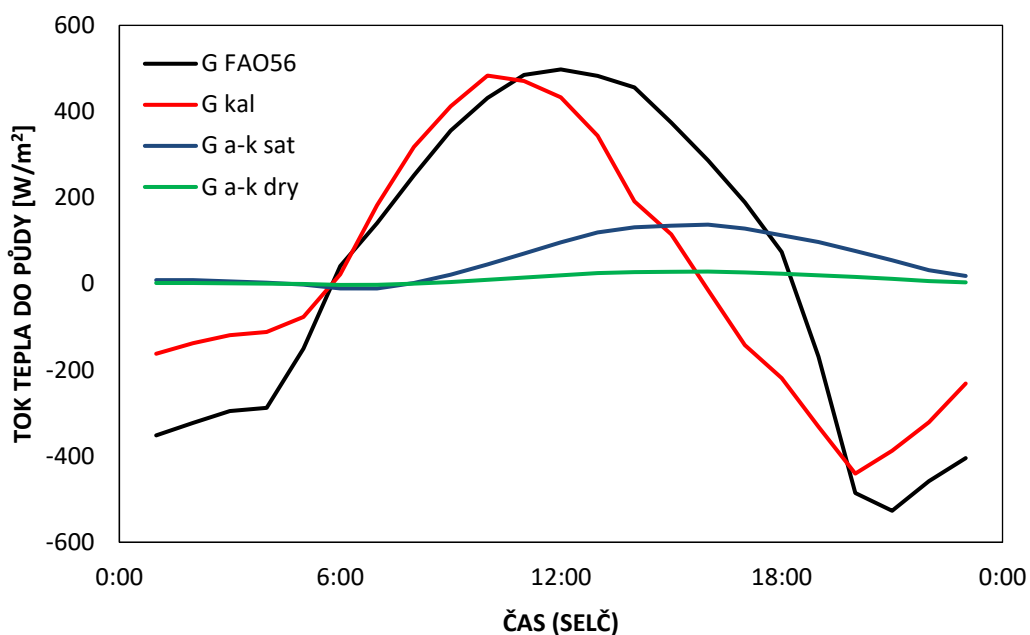
#### **4.4. Stanovení hodnoty toku tepla do půdy a povrchového odporu**

Jako referenční metoda pro porovnání hodnot a průběhu evapotranspirace na jednotlivých stanovištích byla vybrána metoda Penmana-Monteitha. Mezi parametry této rovnice (4), které se určují nepřímo (tedy nejsou měřeny), patří tok tepla do půdy. Dalšími parametry, které jsou určeny výpočtem, jsou povrchový a aerodynamický odpor. Hodnoty těchto parametrů mohou být stanoveny různými postupy. V následující části práce budou uvedeny a porovnány různé způsoby stanovení těchto parametrů.

##### **4.4.1. Tok tepla do půdy**

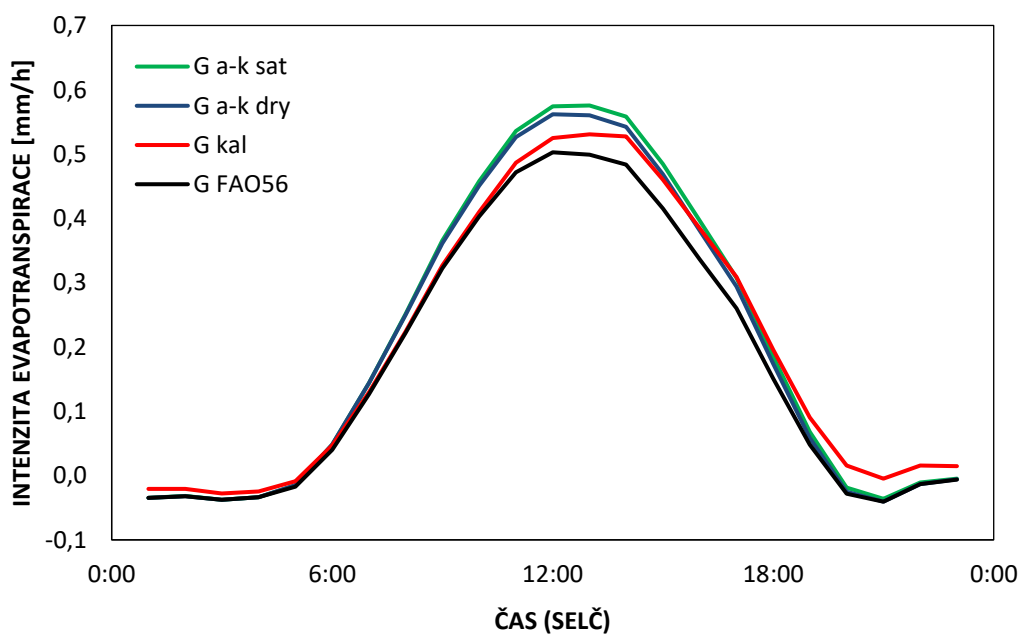
Malá mocnost půdního substrátu na zelené střeše by měla znemožňovat velké toky tepla do půdy, jelikož maximální hloubka půdního substrátu není více jak 10 cm. Výpočet dle metodiky FAO56 tuto skutečnost nezohledňuje, jelikož hodnota toku tepla do půdy se určuje skrze hodnotu čisté solární radiace ( $R_n$ ). Oproti tomu kalorimetrická rovnice a advekčně-konduktivní transportní rovnice zahrnují do výpočtu teplotu substrátu, tudíž by výsledná hodnota toku tepla do půdy mohla být zohledněna v závislosti na mocnosti půdního substrátu. V následující části práce budou tyto metody porovnány.

Porovnání jednotlivých výpočetních metod pro určení hodnoty toku tepla do půdy bylo provedeno pro jeden vybraný den, a to 4. července 2015. Měření meteorologických veličin a teploty půdy probíhalo na stanovišti Roof-Station. Hodnoty byly počítány v hodinovém kroku. Na Obr. 31 jsou porovnány průběhy toků tepla do půdy vypočtené na základě různých výpočetních metod. Z grafu je patrný podobný průběh hodnot vypočtených na základě metodiky FAO56 a kalorimetrické rovnice. Hodnoty těchto dvou metod nabývají výrazně vyšších hodnot než hodnoty získané výpočtem na základě advekčně-konvekční rovnice. Nicméně v noci je tok tepla z půdy vypočtený z kalorimetrické rovnice výrazně nižší než předpovídá postup dle metodiky FAO56. Hodnoty toku tepla do/z půdy jsou dle advekčně-konduktivní rovnice v případě nasycené půdy ještě nižší.



Obr. 31: Porovnání průběhu toku tepla do půdy na stanovišti Roof-Station vypočteného na základě metodiky FAO56, kalorimetrické rovnice () a advektivně-konduktivní rovnice () pro den 4. července 2015.

Na Obr. 32 je porovnán průběh intenzity evapotranspirace pro den 4. července 2015 za použití odlišných metod pro stanovení hodnoty toku tepla do půdy. Z porovnání obou grafů je patrné, že vyšší hodnoty toku tepla do půdy se projevují snížením hodnoty intenzity evapotranspirace.



Obr. 32: Porovnání průběhu intenzity evapotranspirace [mm/h] za použití odlišných metod pro stanovení hodnoty toku tepla do půdy pro den 4. července 2015.

Kumulativní hodnota evapotranspirace pro den 4. července 25015 vypočtená za použití odlišných metod pro stanovení hodnoty toku tepla do půdy je porovnána v Tab. 9.

Tab. 9: Porovnání hodnot evapotranspiračních úhrnů dne 4. července 2015 vypočtených Penmanovou-Monteithovou metodou za použití odlišných metod pro stanovení toku tepla do půdy.

	G FAO56	G Kal	G a-k dry	G a-k sat
<b>EVAPOTRANSPIRAČNÍ ÚHRN [mm]</b>	4,04	4,58	4,58	4,73

Jelikož jsou v případě použití metodiky FAO56 hodnoty toku tepla do půdy nejvyšší v porovnání s ostatními metodami, hodnoty evapotranspiračního úhrnu jsou v tomto případě nejnižší. Nejvyšší hodnota evapotranspiračního úhrnu byla vypočtena při použití advekčně-konduktivní rovnice. Rozdíl v hodnotách evapotranspiračních úhrnů mezi těmito metodami je 0,69 mm. Hodnota získaná při použití kalorimetrické rovnice je stejná jako hodnota získaná při použití advekčně-konduktivní rovnice v případě nasycené půdy.

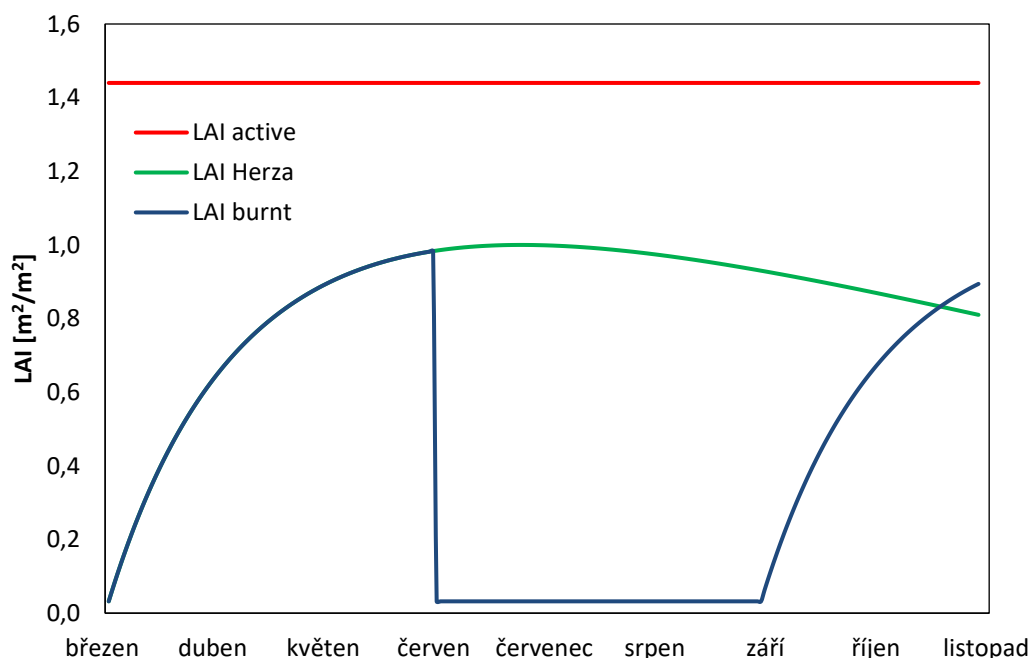
Výše uvedené výsledky potvrzují původní předpoklad, že výpočet dle metodiky FAO56 nezohledňuje mocnost půdního substrátu a výsledné hodnoty toku tepla do půdy jsou oproti ostatním metodám vyšší. Výpočet dle kalorimetrické rovnice a advekčně-konduktivní rovnice poskytuje menší hodnoty. Určení vhodné alternativy k metodě FAO56 není cílem této práce.

#### 4.4.2. Povrchový odpor

Penmanova-Monteithova rovnice pro stanovení hodnoty evapotranspirace (4) v sobě zahrnuje čtyři dílčí faktory ovlivňující proces výparu z půdy a rostlin. Povrchový odpor popisuje míru kladeného odporu průtoku par skrze transpirující vegetaci a půdu. Dle metodiky FAO56 lze povrchový odpor vyjádřit podle vztahu (7). Index aktivní plochy listový ( $LAI_{active}$ ) se stanoví dle vztahu (8). Efektivní výška porostu ( $d$ ) je hodnota, která se volí na základě parametrů vegetace. V případě výpočtů hodnoty evapotranspirace v předcházejících částech práce byla hodnota  $d$  v souladu s metodikou FAO56 uvažována hodnotou 12 cm. Tato hodnota byla uvažována konstantní pro celé vegetační období. Výška vegetace se nicméně v průběhu vegetačního období mění a tím se mění i hodnota povrchového odporu. Možnou alternativou k metodice FAO56 může být stanovení hodnoty  $LAI$  za použití empirické rovnice (9). Z Obr. 33

je patrný průběh  $LAI$  daný rovnicí (9). Rovnice zohledňuje růst vegetace na začátku vegetačního období, vegetační vrchol a postupný ústup vegetace ke konci vegetačního období.

Vegetace se na zelené střeše experimentálního centra UCEEB vyskytuje po většinu roku pouze částečně a navíc dočasně. Na počátku vegetační sezóny vegetace vzroste, ale podstatná část uschne v průběhu prvních letních měsíců a po zbytek vegetační sezóny se na střeše nachází převážně holý půdní substrát nebo plevele. Jedním z možných přístupů pro stanovení hodnoty povrchového odporu odpovídajícím poměrům na zelené střeše budovy UCEEB je vytvoření průběhu  $LAI$  na základě skutečného stavu vegetace v průběhu vegetační sezóny (Obr. 33 –  $LAI_{burnt}$ ).



Obr. 33: Porovnání průběhu hodnot indexu aktivní listové plochy [ $m^2/m^2$ ] vypočtených podle metodiky FAO56 ( $LAI_{active}$ ), dle rovnice (9) ( $LAI_{Herza}$ ) a na základě skutečného stavu vegetace ( $LAI_{burnt}$ ) za vegetační sezónu 2015.

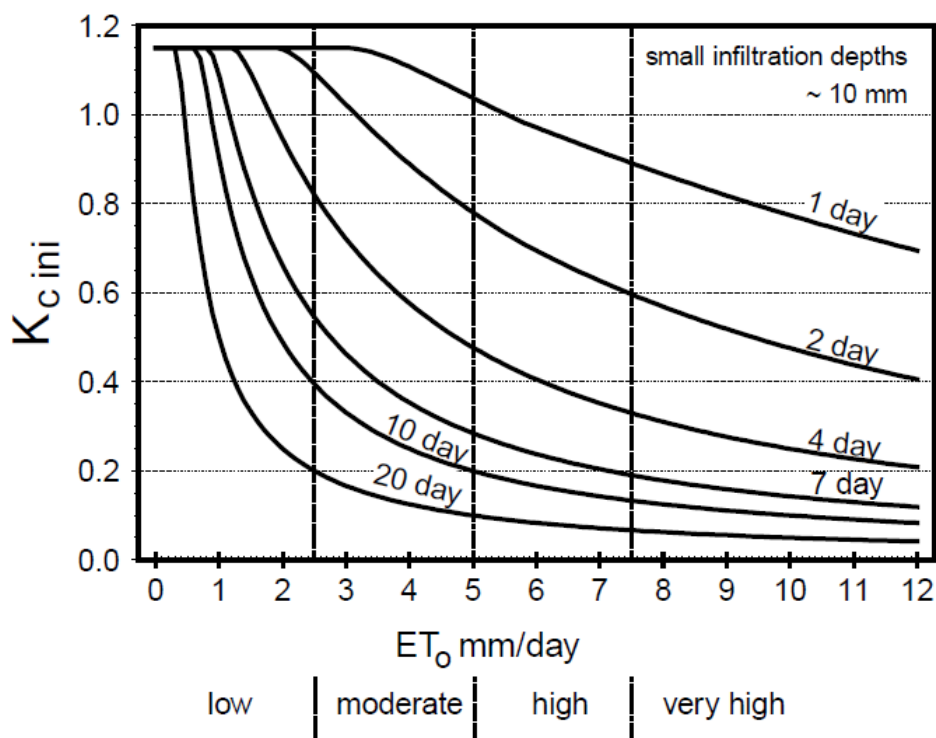
V období od března do června se hodnota  $LAI$  stanoví dle rovnice (9). Na začátku června dojde ke spálení vegetace a po zbytek letních měsíců se na většině plochy zelené střechy nachází holý půdní substrát. V průběhu září poté dochází k opětovnému růstu vegetace a velikost  $LAI$  je opět odvozena dle Herzova vztahu. V době od června do září, kdy se na zelené střeše vyskytuje převážně holá půda, je hodnota evapotranspirace určena dle metodiky FAO56. Jedná se o výpočet evapotranspirace za standartních podmínek ( $ET_c$ ), kdy  $ET_c$  se určí ze vztahu:

$$ET_c = k(C) \cdot ET_0$$

(26)

Kde  $k(C)$  je koeficient zahrnující charakteristiky plodiny a půdy [-].

Koeficient  $k(C)$  se v případě holé půdy stanoví na základě diagramů. Přesněji se jedná o koeficient  $K_{c\ ini}$ , upravující hodnoty evapotranspirace v počátečních stádiích vývoje vegetace, kdy výpar probíhá převážně z půdy. Zásadní pro výběr vhodného diagramu je průměrná infiltrační hloubka vyvolaná srážkovou událostí a četnost srážek. Velikost  $k(C)$  je závislá na hodnotě evapotranspirace pro uvažované období. Hodnoty  $k(C)$  v případě této práce byly stanoveny dle Obr. 34.



Obr. 34: Diagram pro stanovení hodnoty koeficientu  $k(C)$  (převzato z FAO 56).

V Tab. 10 jsou uvedeny výsledné měsíční kumulativní hodnoty evapotranspirace vypočtené dle Penmanova-Monteithova vztahu. Pro každou variantu byl zvolen jiný postup stanovení hodnoty povrchového odporu. Jako referenční byla zvolena hodnota  $LAI_{active}$  z FAO56. Porovnána byla s hodnotou  $LAI$  dle Herzy ( $LAI_{Herza}$ ) a s průběhem  $LAI$  vytvořeným podle stavu vegetace ve vegetačním období ( $LAI_{burnt}$ ). Poslední variantou je výpar z holé půdy po celé vegetační období stanovený dle metodik FAO56 ( $LAI_{bare\ soil}$ ).

Tab. 10: Porovnání měsíčních kumulativních hodnot evapotranspirace vypočtených dle Penmanovy-Monteithovy metody za vegetační sezónu 2015 v případě různých postupů stanovení *LAI*.

[mm]	<b>LAI<sub>active</sub></b>	<b>LAI<sub>Herza</sub></b>	<b>LAI<sub>burnt</sub></b>	<b>LAI<sub>bare soil</sub></b>
<b>BŘEZEN</b>	22,8	12,2	12,2	27,3
<b>DUBEN</b>	58,4	49,4	49,4	55,2
<b>KVĚTEN</b>	88,3	80,9	80,9	75,9
<b>ČERVEN</b>	94,2	87,9	75,8	75,8
<b>ČERVENEC</b>	119,0	110,7	89,5	89,5
<b>SRPEN</b>	100,1	94,5	79,4	79,4
<b>ZÁŘÍ</b>	54,9	49,9	33,6	55,6
<b>ŘÍJEN</b>	18,7	16,6	16,1	22,4
<b>Σ</b>	<b>556,3</b>	<b>502,0</b>	<b>436,8</b>	<b>481,1</b>

Z Tab. 8 je patrné, že v případě zvolení klasického postupu pro stanovení hodnoty *LAI* dle FAO56 získáme pro většinu měsíců nejvyšší hodnoty kumulativní evapotranspirace. Průběh *LAI* dle Herzy sníží výsledné hodnoty kumulativní evapotranspirace pro každý měsíc. V případě, že dojde k odumření vegetace v průběhu vegetačního období, celkový kumulativní úhrn za vegetační sezóny je nižší než v případě výparu z holé půdy. Rozdíl ve vypočítaných kumulativních evapotranspiračních úhrnech je až 120 mm v případě porovnání výpočtu dle FAO56 a průběhu *LAI* dle námi zvoleného scénáře. Pro získání odpovídajících hodnot evapotranspirace je důležité stanovit správné parametry vegetace, a to v průběhu celého vegetačního období.



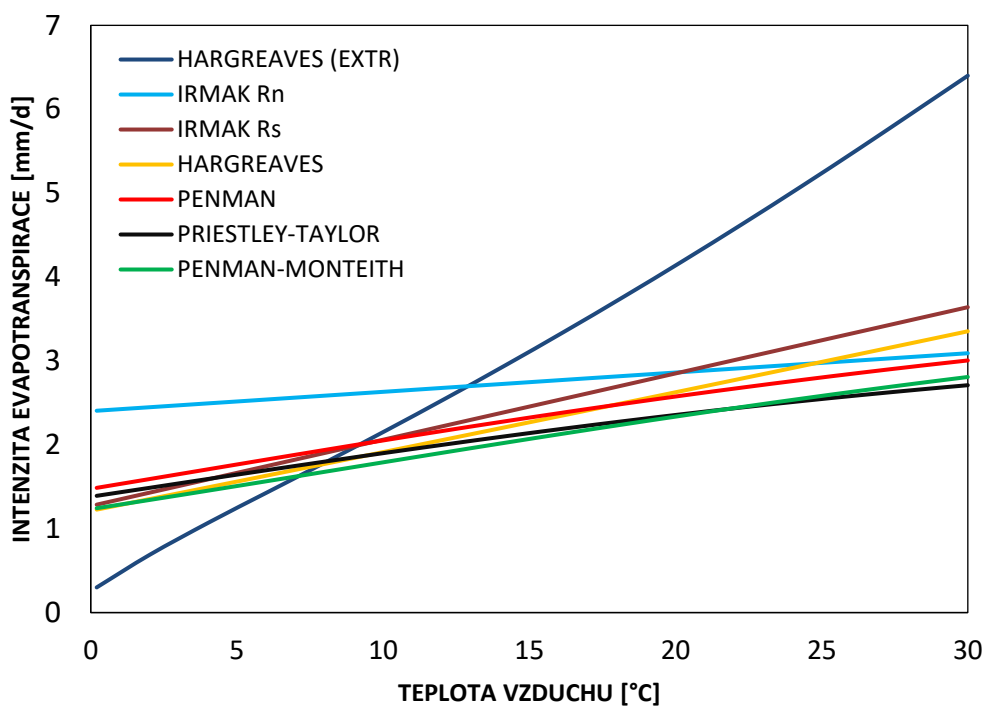
#### 4.5. Citlivostní analýzy výpočetních metod evapotranspirace

V následujícím textu bude zjištěna a porovnána citlivost výpočetních metod evapotranspirace na změny jednotlivých mikrometeorologických veličin. Jako referenční pro porovnání byl vybrán den 7. srpen 2014. K tomuto dni se budou vztahovat variace jednotlivých parametrů, kterými jsou teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, tlak vzduchu, rychlost větru, čistá a globální radiace. Hodnoty jednotlivých parametrů byly variovány pro daný den ve fyzikálně přípustných mezích. Teplota vzduchu byla variována na intervalu od 0°C do 30°C, vlhkost vzduchu od 0% do 100%, tlak vzduchu od 960 hPa do 990 hPa, rychlost větru od 0 m/s do 4 m/s, čistá radiace od 0 W/m<sup>2</sup> do 200 W/m<sup>2</sup> a globální radiace od 0 W/m<sup>2</sup> do 500 W/m<sup>2</sup>. Porovnány budou metody Hargreavese, Irmaka, Penmana, Penmana-Monteitha a Priestleyho-Taylorova. V Tab. 11 jsou uvedeny hodnoty jednotlivých fixovaných mikrometeorologických veličin.

Tab. 11: Hodnoty mikrometeorologických veličin pro den 7. srpna 2014, které byly při citlivostní analýze fixovány.

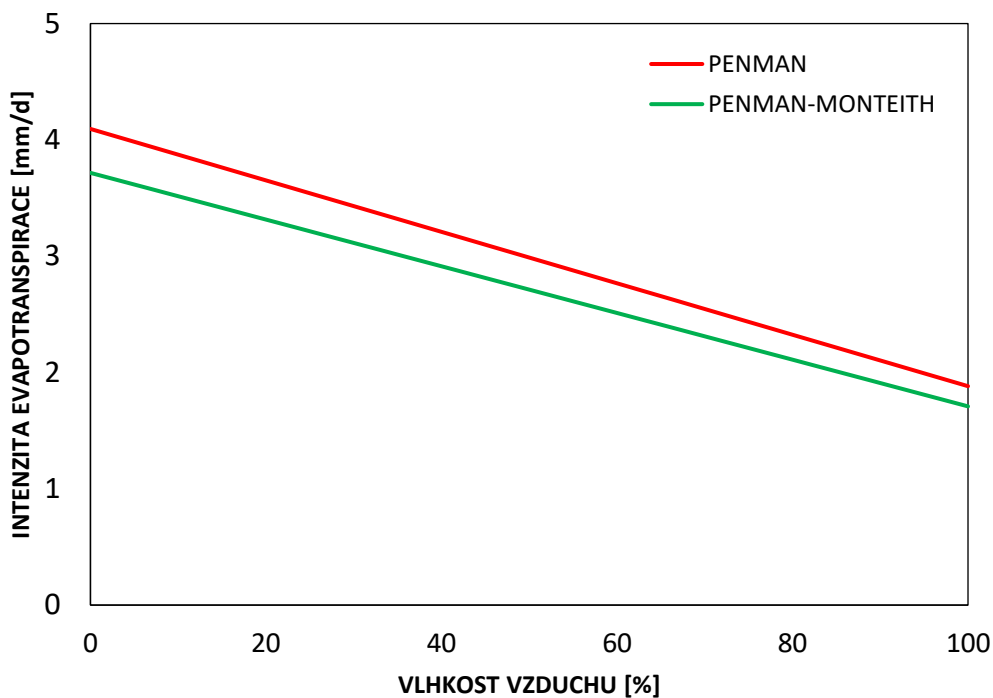
VELIČINA	MINIMUM	MAXIMUM	ARIT. PRŮMĚR
TEPLOTA VZDUCHU 2 m (°C)	14,7	25,0	20,3
PŘÍZEMNÍ TEPLOTA VZDUCHU (°C)	14,3	25,2	20,1
RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU (%)	38,4	91,3	68,1
RYCHLOST VĚTRU (m/s)	50,0	3,3	1,0
ČISTÁ RADIACE (W/m <sup>2</sup> )	-63,6	579,2	76,8
GLOBÁLNÍ RADIACE (W/m <sup>2</sup> )	-5,51	709,9	146,5
EXTRATERESTRIÁLNÍ RADIACE (W/m <sup>2</sup> )	-	-	423,3

Všechny vybrané metody výpočtu evapotranspirace jsou citlivé na změnu teploty vzduchu, nejvíce potom Hargreavesova metoda využívající jako další vstupní údaj hodnoty extraterestriální radiace. Oproti ostatním metodám dosahuje při teplotách nad 15 stupňů vysokých hodnot denní intenzity evapotranspirace. Je tomu tak z důvodu, že empirické koeficienty Hargreavesovy rovnice využívající jako vstupní údaj hodnoty extraterestriální radiace nejsou uzpůsobeny pro zeměpisnou šířku naší experimentální lokality. Všechny metody vykazují lineární závislost intenzity evapotranspirace na teplotě vzduchu. Zvýšení průměrné denní teploty o 20 stupňů zvýší vypočtenou hodnotu intenzity evapotranspirace v průměru o 2,6 mm/d.



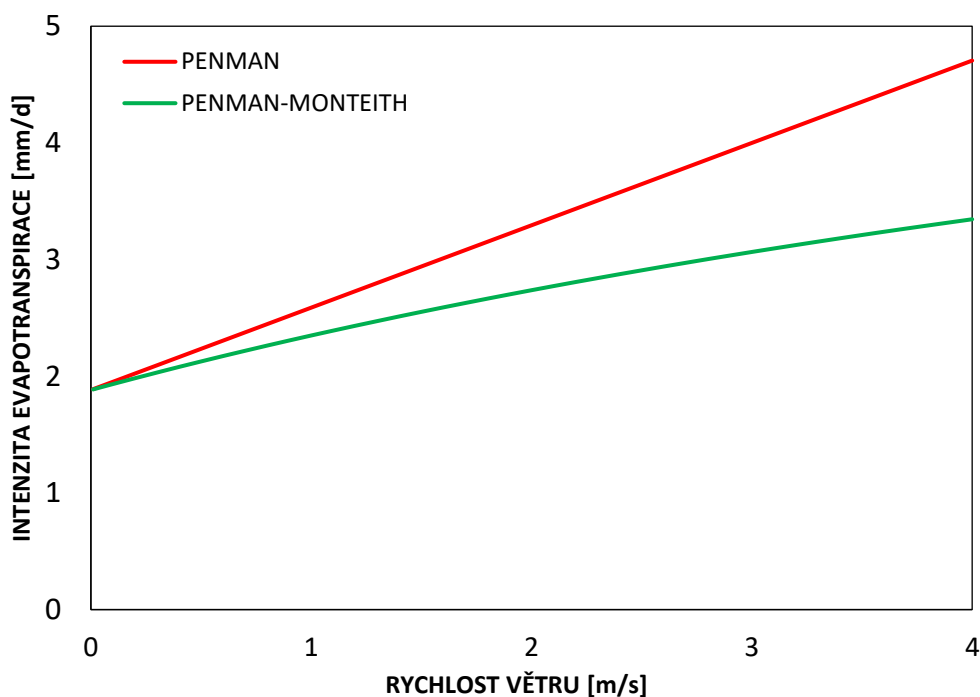
Obr. 35: Citlivost jednotlivých metod na změnu teploty vzduchu variované od 0°C do 30°C.

Pouze dvě metody z vybraných sedmi obsahují jako vstupní parametr vlhkost vzduchu. Jsou jimi Penmanova a Penmanova-Monteithova metoda. Závislost mezi intenzitou evapotranspirace a vlhkostí vzduchu je v těchto dvou případech lineární klesající. Intenzita evapotranspirace je nejvyšší při nízké vlhkosti vzduchu. Z grafu je dále patrné, že dle těchto dvou rovnic dochází k výparu i při 100% vlhkosti vzduchu.



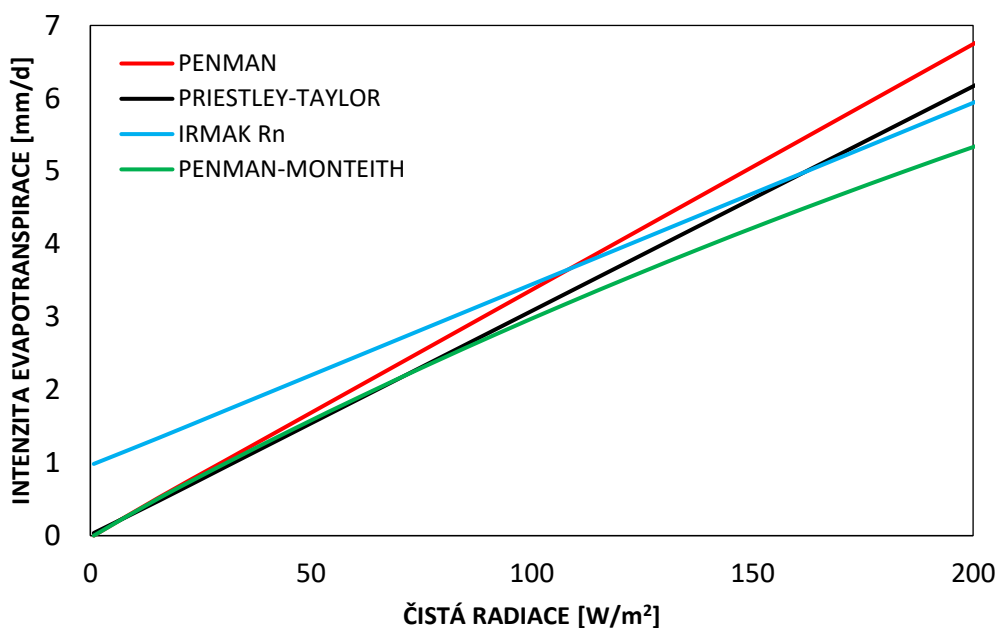
Obr. 36: Citlivost Penmanovy a Penmanovy-Monteithovy metody na změnu vlhkosti vzduchu variované od 0% do 100%.

Změna rychlosti větru se projevuje změnou hodnoty intenzity evapotranspirace ve dvou případech, a to u Penmanovy a Penmanovy-Monteithovy metody. U obou metod se s rostoucí rychlostí větru zvyšuje i intenzita evapotranspirace, přičemž se jedná o lineární závislost. Při nulové rychlosti větru Penmanova a Penmanova-Monteithova metoda poskytují téměř identické výsledky intenzity evapotranspirace. S rostoucí rychlostí větru se zvyšuje i rozdíl v hodnotách intenzity evapotranspirace mezi Penmanovou a Penmanovou-Monteithovou metodou. Tento rozdíl je způsobený tím, že Penmanova rovnice neuvažuje na rozdíl od rovnice Penmana-Monteitha povrchový odpor. Ostatní výpočetní metody rychlost větru jako vstupní parametr neuvažují.

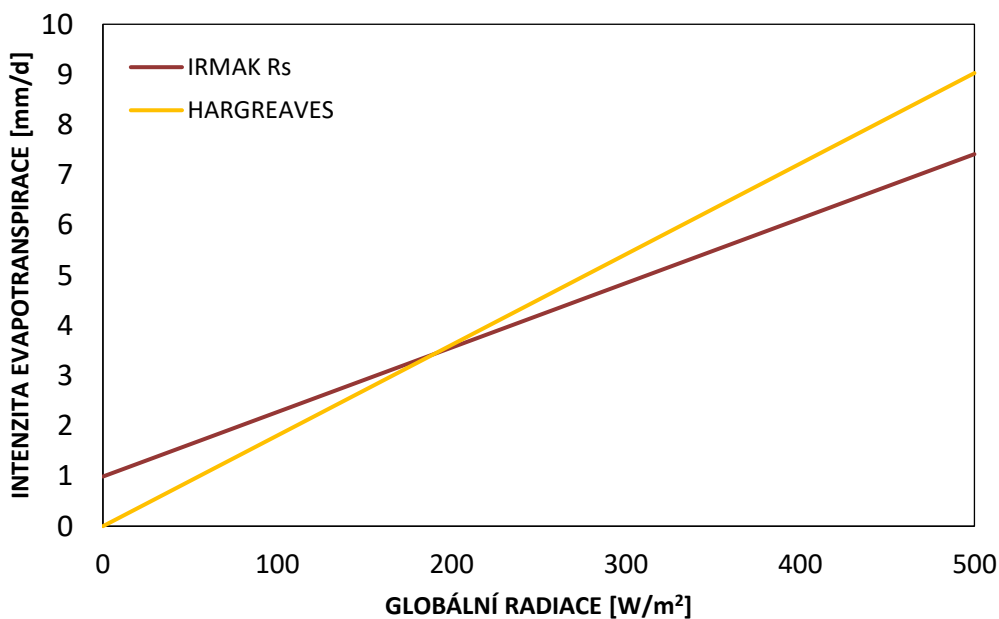


Obr. 37: Citlivost Penmanovy a Penmanovy-Monteithovy metody na změnu rychlosti větru variovanou od 0 m/s do 4 m/s.

Všechny vybrané výpočetní metody jsou citlivé na změnu radiačního příkonu, a to vyjádřeného jak formou čisté radiace, tak radiace globální. Ve všech případech se jedná o závislost lineární zvyšující se s rostoucí intenzitou radiace. Z grafů je dále patrné, že kromě Irmakových metod všechny výpočetní metody při nulové hodnotě čisté nebo globální radiace uvažují nulovou intenzitu evapotranspirace. V této práci bylo prokázáno na základě provedeného evaporačního experimentu, že k výparu může docházet i při záporných hodnotách čisté radiace.



Obr. 38: Citlivost jednotlivých metod na změnu čisté radiace variovanou od 0  $W/m^2$  do 200  $W/m^2$ .



Obr. 39: Citlivost jednotlivých metod na změnu globální radiace variovanou od 0  $W/m^2$  do 500  $W/m^2$ .

Z vybraných metod je na změnu tlaku vzduchu citlivá metoda Penmana, Penmana-Monteitha a Priestleyho-Taylor. Hodnota tlaku vzduchu je důležitá pro výpočet psychrometrické konstanty vyskytující se v těchto rovnicích. Změna tlaku vzduchu z 960 hPa na 990 hPa vyvolá úbytek intenzity evapotranspirace pouze v tisícinách mm/d.

## 5. Závěr

Výpar je jedním ze základních prvků hydrologické bilance, jehož stanovení je důležité pro správné hospodaření s vodními zdroji, zemědělství, lesnictví, energetiku, a také pro pochopení vztahů mezi změnou klimatu a využíváním půdy. Obtížnost stanovení jeho správné hodnoty spočívá v tom, že se jedná o velmi složitý a komplikovaný proces měnící se v čase a prostoru ovlivněný mnoha faktory v jeho průběhu. Spolehlivé přístupy pro kvantifikaci vypařování jsou při probíhajících klimatických změnách a současných obavách o kvalitu životního prostředí nezbytné.

V diplomové práci byly popsány základní principy, na kterých jsou založené výpočetní mikrometeorologické metody pro stanovení hodnoty výparu (mikrometeorologické metody, empirické rovnice, metody vodní bilance). Dále byly popsány faktory ovlivňující výpar, mezi které patří počasí, charakteristika plodin, pěstitelské postupy a další environmentální aspekty. V rešerši jsou představeny vybrané vědecké studie domácích a zahraničních autorů, které se zabývají problematikou stanovení výparu a úzce se vztahují k tématu práce. V metodické části byly popsány klimatické poměry oblasti Kladna - Buštěhradu, přístrojové vybavení a průběh experimentu.

Z údajů naměřených při evaporačním experimentu byla vyhodnocena prostorová variabilita výparu z volné hladiny na extenzivní zelené střeše a přilehlé střeše pokryté betonovou dlažbou budovy UCEEB. Výsledky provedeného experimentu potvrdily očekávanou prostorovou variabilitu způsobenou přítomností atik a dalších konstrukcí na extenzivní zelené střeše budovy UCEEB. Variabilita v rozsahu 30% průměrné výšky výparu má výrazný vliv na hydrologickou bilanci studovaného střešního systému. Experimentálně zjištěný průběh výparu byl porovnán s hodnotami výparu získanými výpočtem z naměřených meteorologických dat.

Vybrané výpočetní metody pro stanovení výparu byly porovnány za použití naměřených meteorologických dat za dvě vegetační sezóny. U jednotlivých metod byla porovnána jejich citlivost na změnu teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu, rychlosti větru a radiačního příkonu. Největší vliv na výslednou hodnotu výparu má dle provedené analýzy teplota vzduchu a radiační příkon.

## 6. Reference

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. a Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. pp. 300.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S. a Perrier, A. (1994) An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43 (2), 33-59.
- Ball, J. T., Woodrow, I. E. a Berry J. A. (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions, Progress in photosynthesis research, Vol. 4, Kluwer academic publishers, 221-224.
- Beljaars, A. C. M. a Viterbo, P. (1994) The sensivity of winter evaporation to the formulation of aerodynamic resistance in the ECMWF model, Boundary-Layer Meteorol, 71: 135.
- Blaney, H. F. a Criddle, W. D. (1950) Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Pap. No. 96, 48 pp.
- Burman, R. a Pochop, L. O. (1994) Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data, Elsevier Science B. V.: Amsterdam.
- Casson, S. A. a Hetherington, A. M. (2010) Environmental regulation of stomatal development, Current Opinion in Plant Biology, 14 (1): 90-95.
- Cleverly, J., Eamus, D. (2013) Aerodynamic resistance and Penman-Monteith evapotranspiration over a seasonally two-layered canopy in semiarid central Australia, Journal of Hydrometeorology, Vol. 14, pp. 1562.
- Doorenbos, J. a Pruitt, W. O. (1977) Crop water requirements. In: Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, pp. 144.
- Droogers, P. a Allen R. G. (2002) Estimating Reference Evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Sys., 16, 33-45.
- Fricker, M. a Willmer, C. (2012) Stomata, Springer Netherlands, p. 18.
- Gentine, P., Entekhabi, D. a Heusinkveld, B. (2012.) Systematic errors in ground heatflux estimation and their correction, Water Resour. Res. 48, W09541.
- Haith, D. A. a Shoemaker, L. L. (1987) Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. Water Resources Bulletin, 23:471-478.



- Hargreaves, G. H. a Samani, Z A (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), 96-99.
- Chanduvi-Acuña, F. (1969) A Study of Evaporation and Evapotranspiration in Peru, All Graduate Theses and Dissertations, Paper 1555.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., a Jones, J. W. (2003) Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 129(5):336-347.
- Jensen, M. E., Burman, R. D. a Allen, R. G. (1990) Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No.70, Am. Soc. Civil Engineers, New York, pp. 360.
- Lynn, B. H. a Carlson, T. N. (1990) A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration, *Agric For Meteorol.*, 52(3),5-43.
- Monteith J. L. (1981) Evaporation and surface-temperature, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107: 1–27.
- Monteith, J. L. (1965) Evaporation and the environment. In: *The state and movement of water in living organisms*, XIXth Symposium, Soc. of Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, 205-234.
- Nash, J.E. (1989) Potential evaporation and „the complementary relationship“, *Journal of Hydrology*, 111, s.1-7.
- Penman, H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120-146.
- Priestley, C. H. B. a Taylor, R. J. (1972) On the assessment of surface space heat flux and evaporation using large scale parameters, *Mon. Weather Rev.*, 106, 81-92.
- Shuttleworth W.J. (1993): Evaporation. In: Maidment D.R. (ed.): *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York, 4.12.
- Stricker, H. a Brutsaert, W. (1978) Actual Evapotranspiration over a Summer Period in the Hupsel Catchment, *Journal of Hydrology*, 39, 139-157.
- Sumner, D. M. a Jacobs, J. M. (2005) Actual pasture evapotranspiration modelled using combination methods, reference evapotranspiration, and pan evaporation, *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 81-104.
- Thom, A. S. a Oliver, H. R. (1977) On Penman's equation for estimating regional evaporation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 103, 345-357.

Wallace, J. S. (1995) Calculating evaporation: resistance to factors. *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 353-366.

Wang, Z.-H. a Bou-Zeid, E. (2012) A novel approach for the estimation of soil groundheat flux, *Agric. For. Meteorol.* 154–155, 214–221.

Wright, I. J. a Harding, R. J. (1993) Evaporation from natural mountain grassland, *Journal of Hydrology*, 145, 267-283.

Ziemer R. R. (1979) Evaporation and transpiration. *Reviews of geophysics and space physics*, Vol. 17, No. 6, 1175-1186.

## 7. Přílohy

### 7.1. Tabulky a grafy

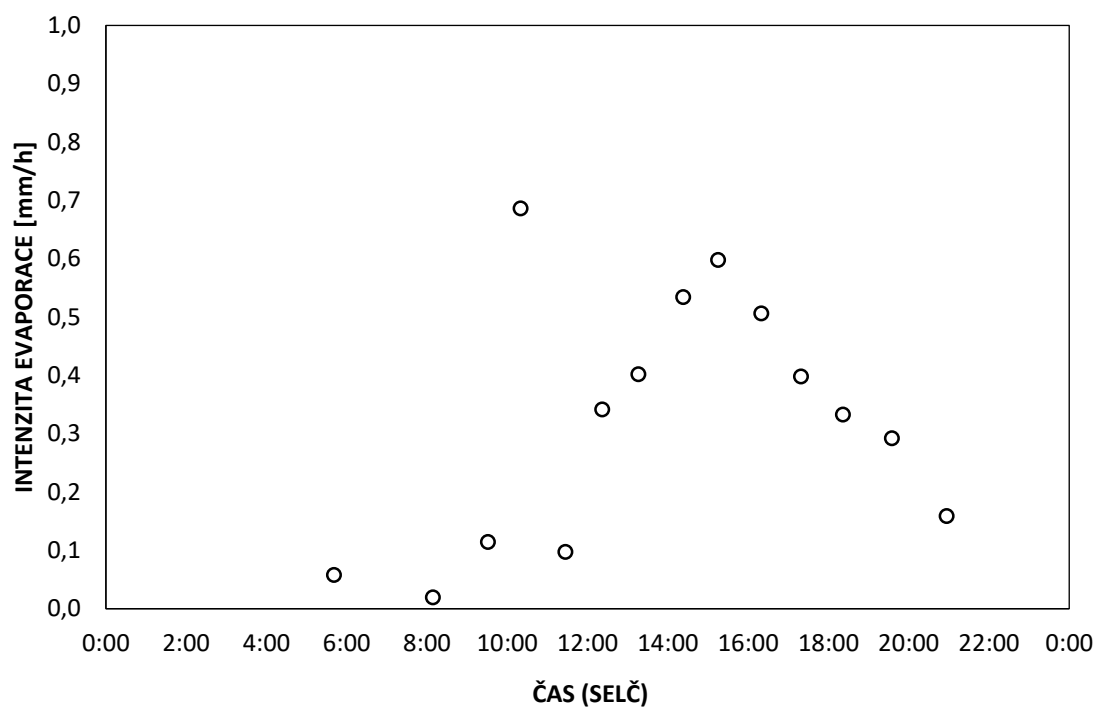
#### 7.1.1. Vyhodnocení evaporačního experimentu

Tab. 1: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EPO umístěného v severozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

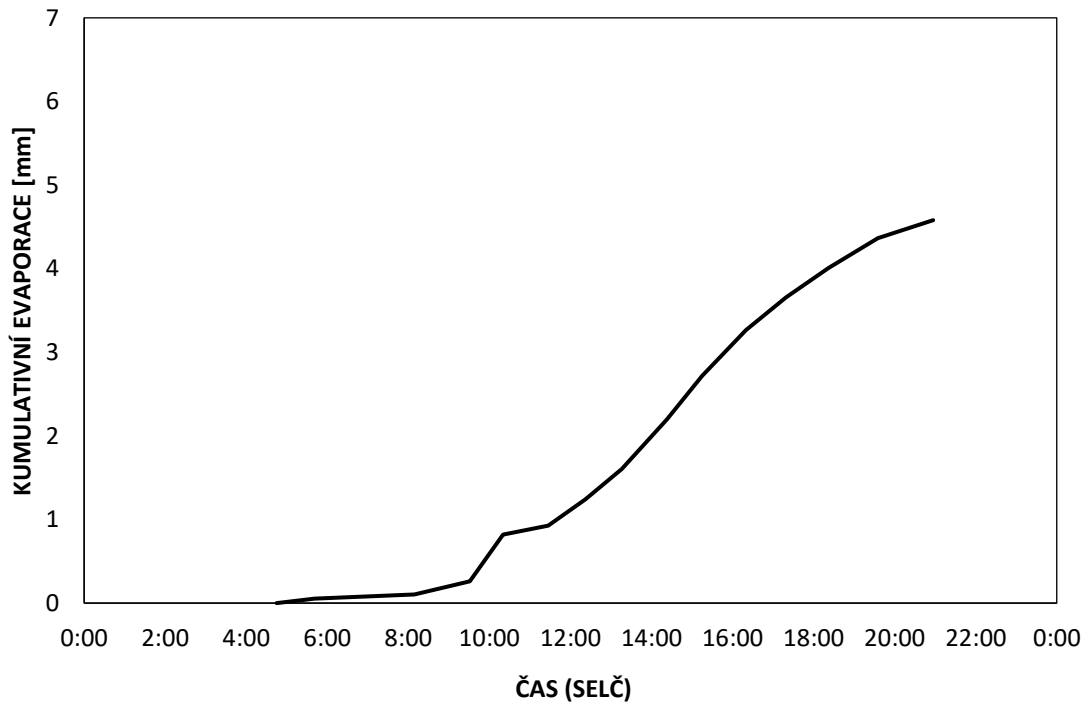
STANOVIŠTĚ EPO						
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	POZNÁMKA
	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	888,4	53,540	-	-	-	za tmy
4:45	886,4	53,415	-	-	0	ve stínu
5:41	885,5	53,361	0,054	0,058	0,054	ve stínu
8:09	884,7	53,313	0,048	0,020	0,102	ve stínu
9:31	882,1	53,156	0,157	0,115	0,259	na slunci
10:20	872,8	52,595	0,560	0,686	0,820	na slunci
11:27	871,0	52,487	0,108	0,097	0,928	na slunci
12:22	865,8	52,174	0,313	0,342	1,241	na slunci
13:16	859,8	51,812	0,362	0,402	1,603	na slunci
14:23	849,9	51,215	0,597	0,534	2,200	na slunci
15:15	841,3	50,697	0,518	0,598	2,718	na slunci
16:20	832,2	50,149	0,548	0,506	3,266	na slunci
17:19	825,7	49,757	0,392	0,398	3,658	na slunci
18:22	819,9	49,408	0,350	0,333	4,007	ve stínu
19:35	814,0	49,052	0,356	0,292	4,363	ve stínu
20:57	810,4	48,835	0,217	0,159	4,580	ve stínu

Tab. 2: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EPO umístěného v severozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

STANOVIŠTĚ EPO		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,191	0,283	4,580



Obr. 1: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EPO umístěného v severozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).



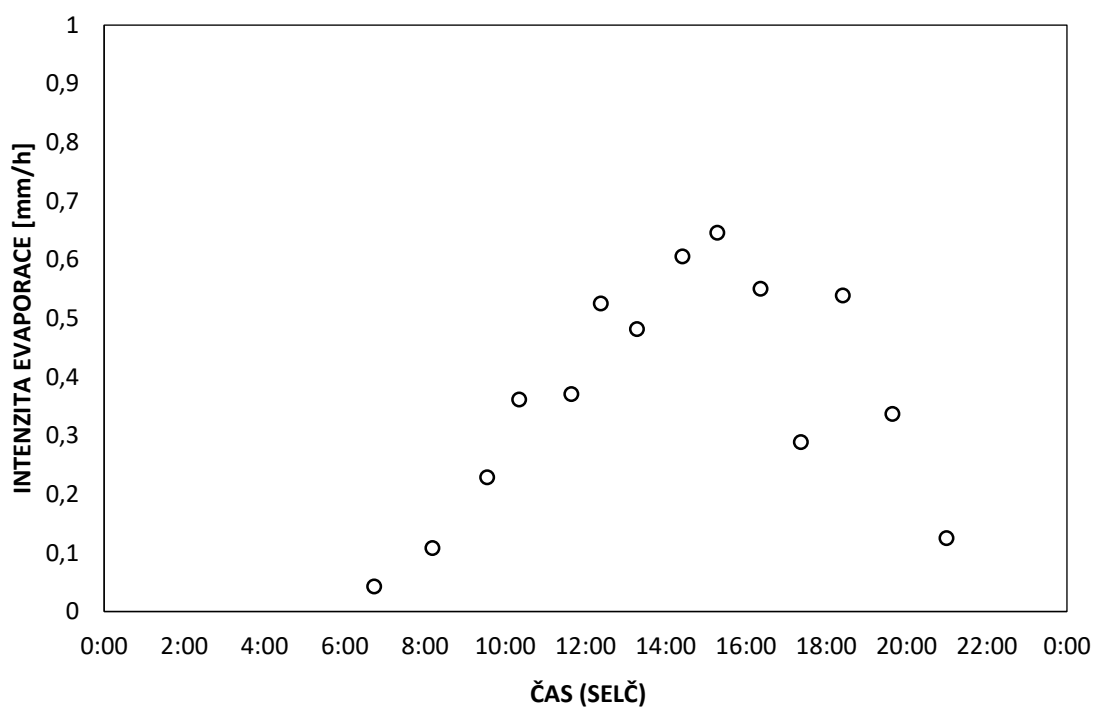
Obr. 2: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EPO umístěného v severozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

Tab. 3: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP1 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

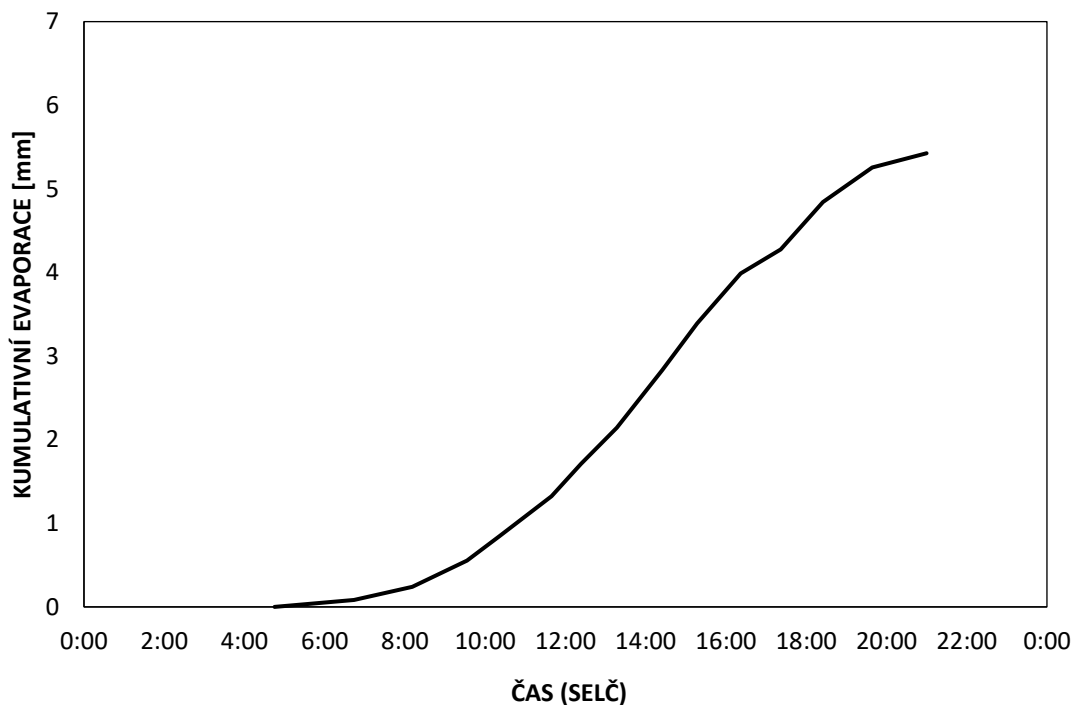
<b>STANOVIŠTĚ EP1</b>						
<b>ČAS MĚŘENÍ</b>	<b>HMOTNOST VODY</b>	<b>ÚROVEŇ HLADINY</b>	<b>VÝPARNÁ VÝŠKA</b>	<b>INTENZITA EVAPORACE</b>	<b>KUMULATIVNÍ EVAPORACE</b>	<b>POZNÁMKA</b>
	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	888,8	53,52	-	-	-	za tmy
4:45	886,5	53,384	-	-	0,000	ve stínu
6:44	885,1	53,299	0,084	0,043	0,084	ve stínu
8:11	882,5	53,143	0,157	0,108	0,241	na slunci
9:33	877,3	52,830	0,313	0,229	0,554	na slunci
10:21	872,5	52,541	0,289	0,361	0,843	na slunci
11:39	864,5	52,059	0,482	0,371	1,325	na slunci
12:23	858,1	51,673	0,385	0,526	1,710	na slunci
13:17	850,9	51,240	0,434	0,482	2,144	na slunci
14:25	839,5	50,553	0,686	0,606	2,830	na slunci
15:17	830,2	49,993	0,560	0,646	3,390	na slunci
16:22	820,3	49,397	0,596	0,550	3,986	na slunci
17:22	815,5	49,108	0,289	0,289	4,276	na slunci
18:25	806,1	48,542	0,566	0,539	4,842	ve stínu
19:39	799,2	48,127	0,416	0,337	5,257	ve stínu
21:00	796,4	47,958	0,169	0,125	5,426	ve stínu

Tab. 4: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP1 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

<b>STANOVIŠTĚ EP1</b>		
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE</b>	<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)</b>	<b>EVAPORAČNÍ ÚHRN</b>
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,226	0,334	5,426



Obr. 3: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP1 umístěného ve střední linii střechy v západo-východním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).



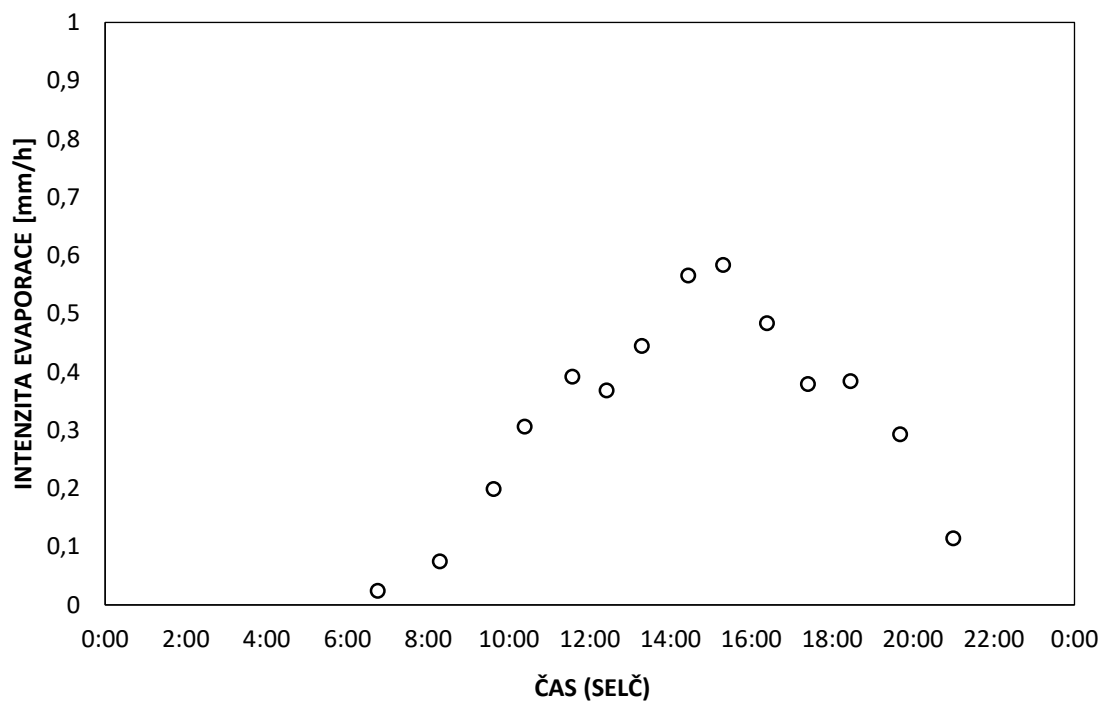
Obr. 4: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP1 umístěného ve střední linii střechy v západo-východním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

Tab. 5: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP2 umístěného v jihozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

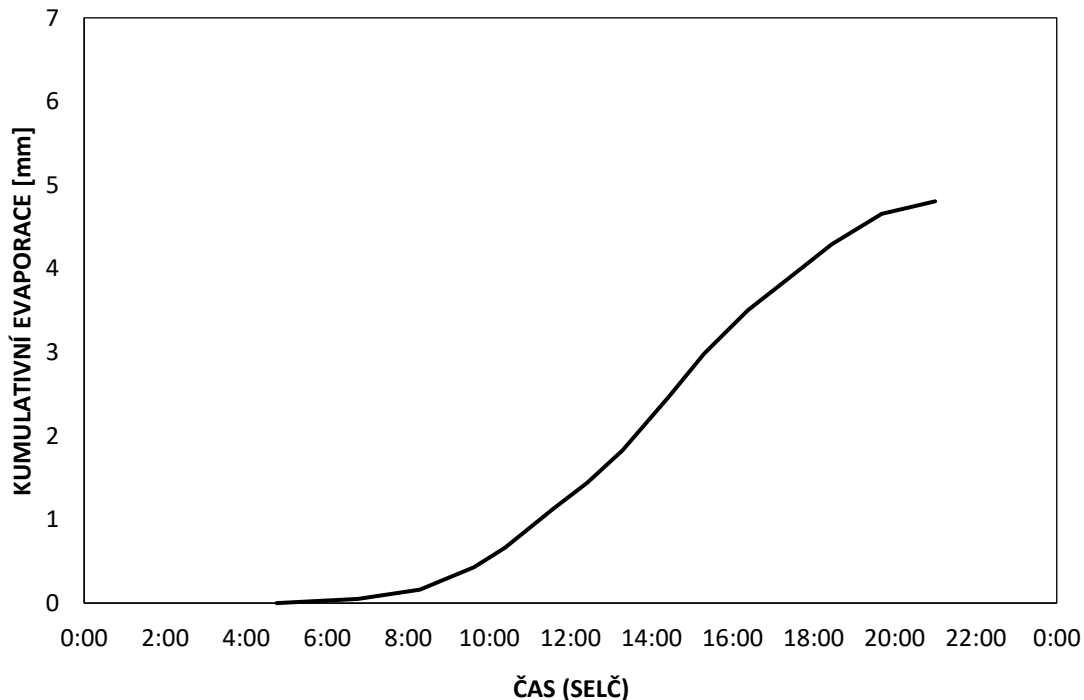
<b>STANOVIŠTĚ EP2</b>						
<b>ČAS MĚŘENÍ</b>	<b>HMOTNOST VODY</b>	<b>ÚROVEŇ HLADINY</b>	<b>VÝPARNÁ VÝŠKA</b>	<b>INTENZITA EVAPORACE</b>	<b>KUMULATIVNÍ EVAPORACE</b>	<b>POZNÁMKA</b>
<b>SELČ</b>	<b>[g]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>	
22:00	885,1	53,30	-	-	-	za tmy
4:45	882,5	53,143	-	-	0,000	ve stínu
6:44	881,7	53,095	0,048	0,024	0,048	ve stínu
8:11	879,8	52,980	0,114	0,075	0,163	na slunci
9:33	875,4	52,715	0,265	0,199	0,428	na slunci
10:21	871,5	52,480	0,235	0,306	0,662	na slunci
11:39	863,8	52,017	0,464	0,392	1,126	na slunci
12:23	858,6	51,703	0,313	0,368	1,439	na slunci
13:17	852,2	51,318	0,385	0,445	1,825	na slunci
14:25	841,4	50,668	0,650	0,566	2,475	na slunci
15:17	833	50,162	0,506	0,584	2,981	na slunci
16:22	824,3	49,638	0,524	0,484	3,505	na slunci
17:22	817,9	49,253	0,385	0,379	3,890	na slunci
18:25	811,2	48,849	0,403	0,384	4,294	ve stínu
19:39	805,2	48,488	0,361	0,293	4,655	ve stínu
21:00	802,7	48,337	0,151	0,114	4,805	ve stínu

Tab. 6: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP2 umístěného v jihozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

<b>STANOVIŠTĚ EP2</b>		
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE</b>	<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)</b>	<b>EVAPORAČNÍ ÚHRN</b>
<b>[mm/h]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>
0,200	0,296	4,805



Obr. 5: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP2 umístěného v jihozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).



Obr. 6: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP2 umístěného v jihozápadním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

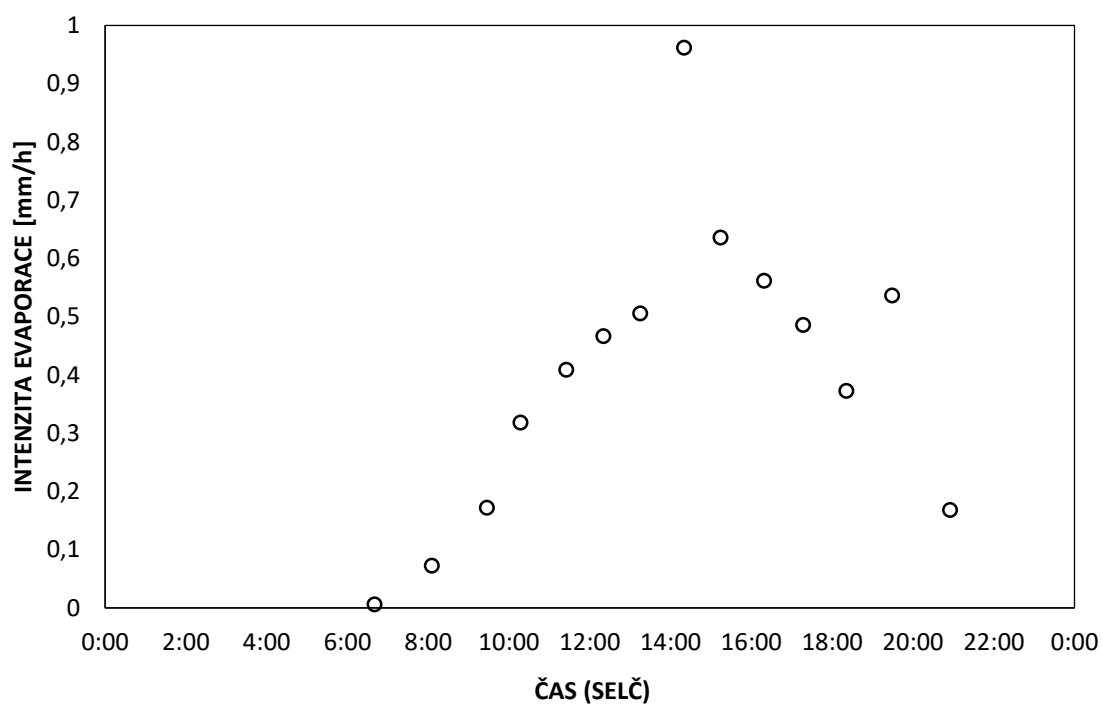


Tab. 7: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP3 umístěného ve střední linii střechy v západo-východním směru (tj. cca 6 m od krajů).

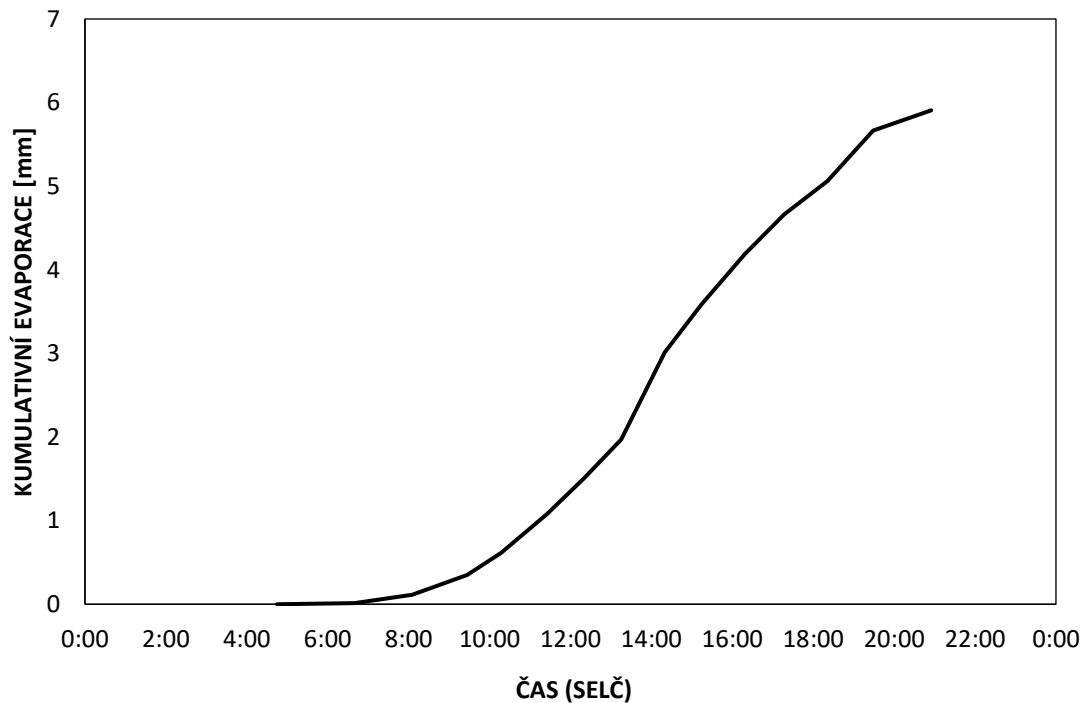
STANOVIŠTĚ EP3						
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	891,5	53,68	-	-	-	za tmy
4:45	888,6	53,510	-	-	0,000	ve stínu
6:40	888,4	53,498	0,012	0,006	0,012	ve stínu
8:05	886,7	53,396	0,102	0,072	0,114	na slunci
9:27	882,8	53,161	0,235	0,172	0,349	na slunci
10:17	878,4	52,896	0,265	0,318	0,614	na slunci
11:25	870,7	52,432	0,464	0,409	1,078	na slunci
12:20	863,6	52,005	0,428	0,466	1,505	na slunci
13:15	855,9	51,541	0,464	0,506	1,969	na slunci
14:20	838,6	50,499	1,042	0,962	3,011	na slunci
15:14	829,1	49,927	0,572	0,636	3,583	na slunci
16:19	819	49,319	0,608	0,561	4,191	na slunci
17:17	811,2	48,849	0,470	0,486	4,661	na slunci
18:21	804,6	48,452	0,397	0,373	5,058	na slunci
19:29	794,5	47,843	0,608	0,537	5,667	na slunci
20:55	790,5	47,603	0,241	0,168	5,907	na slunci

Tab. 8: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP3 umístěného ve střední linii střechy v západo-východním směru (tj. cca 6 m od krajů).

STANOVIŠTĚ EP3		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,246	0,365	5,907



Obr. 7: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP3 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů).



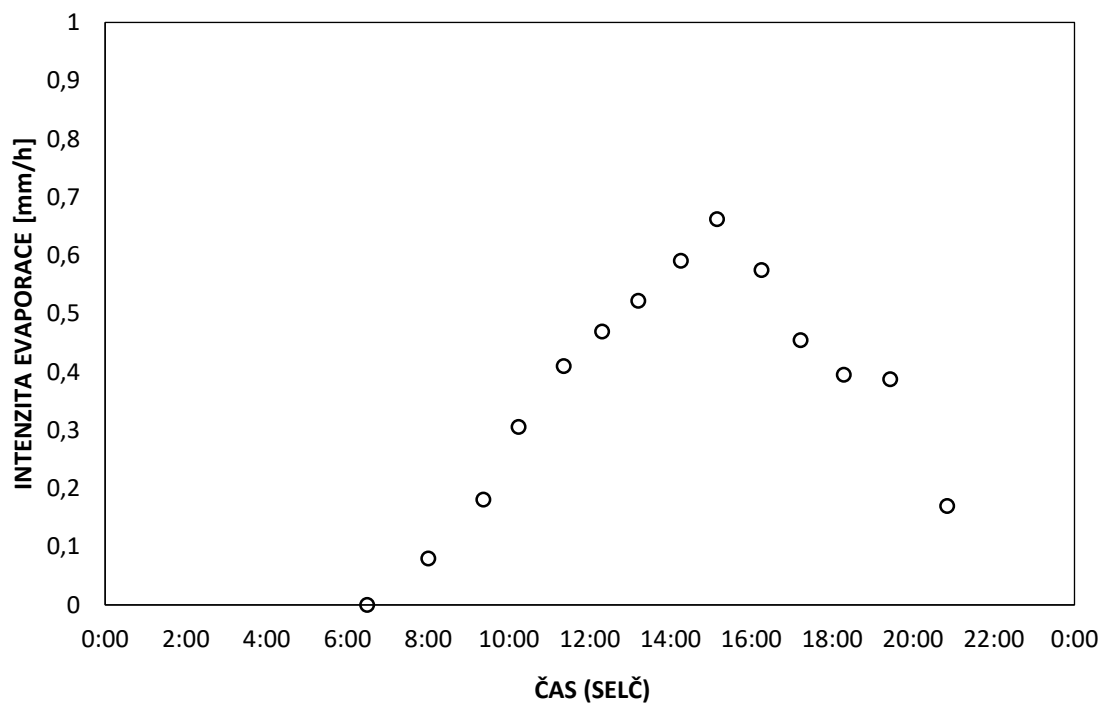
Obr. 8: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP3 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů).

Tab. 9: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP4 umístěného u severního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

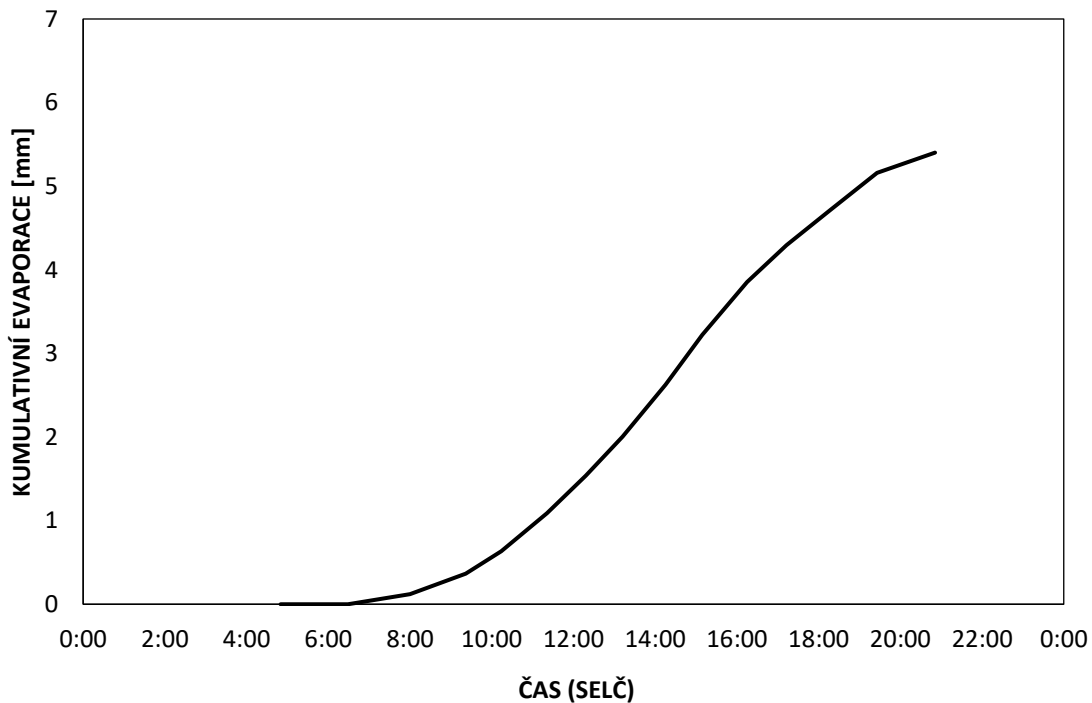
STANOVIŠTĚ EP4						
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	882,5	53,14	-	-	-	za tmy
4:50	880,4	53,016	-	-	0,000	ve stínu
6:29	880,4	53,016	0,000	0,000	0,000	ve stínu
8:00	878,4	52,896	0,120	0,079	0,120	na slunci
9:22	874,3	52,649	0,247	0,181	0,367	na slunci
10:14	869,9	52,384	0,265	0,306	0,632	na slunci
11:21	862,3	51,926	0,458	0,410	1,090	na slunci
12:18	854,9	51,481	0,446	0,469	1,536	na slunci
13:12	847,1	51,011	0,470	0,522	2,005	na slunci
14:15	836,8	50,391	0,620	0,591	2,626	na slunci
15:09	826,9	49,795	0,596	0,662	3,222	na slunci
16:15	816,4	49,162	0,632	0,575	3,854	na slunci
17:13	809,1	48,723	0,440	0,455	4,294	na slunci
18:17	802,1	48,301	0,422	0,395	4,715	na slunci
19:26	794,7	47,856	0,446	0,387	5,161	ve stínu
20:51	790,7	47,615	0,241	0,170	5,402	ve stínu

Tab. 10: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP4 umístěného u severního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

STANOVIŠTĚ EP4		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,225	0,337	5,402



Obr. 9: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP4 umístěného u severního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.



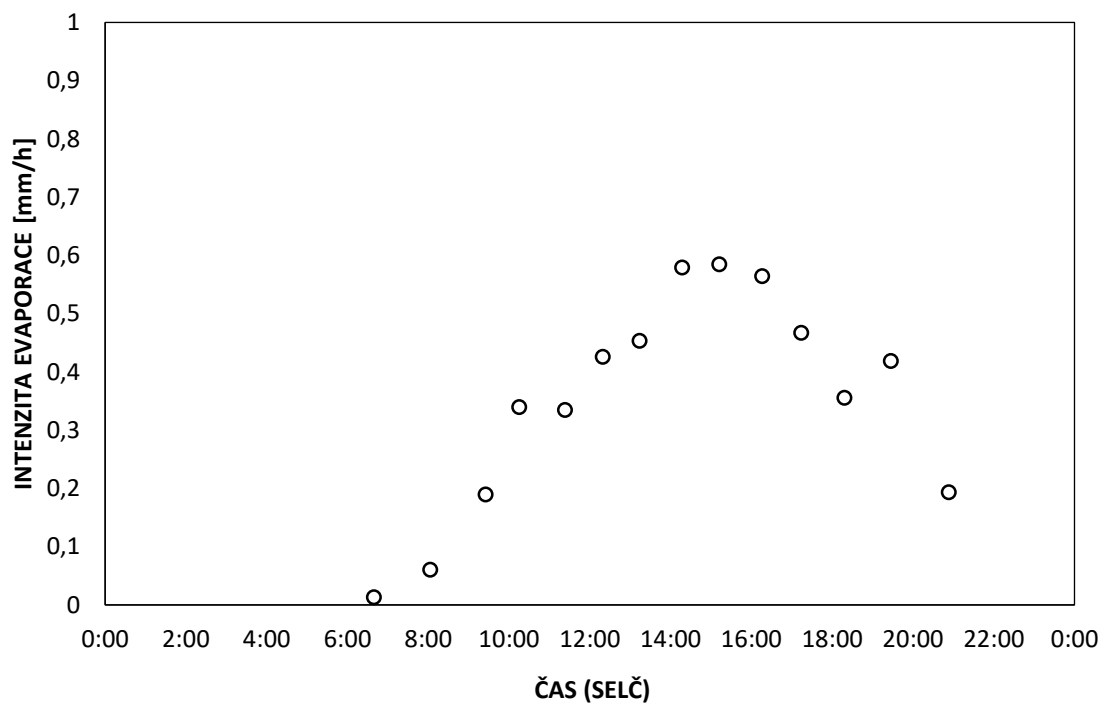
Obr. 10: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP4 umístěného u severního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

Tab. 11: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP6 umístěného u jižního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

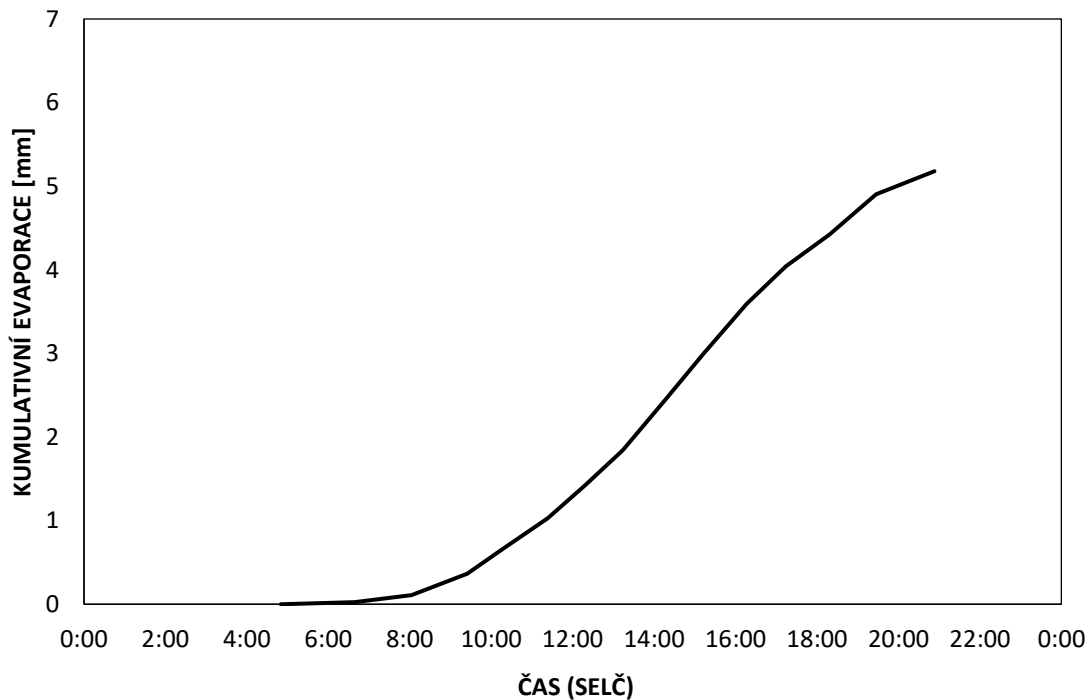
<b>STANOVIŠTĚ EP6</b>						
<b>ČAS MĚŘENÍ</b>	<b>HMOTNOST VODY</b>	<b>ÚROVEŇ HLADINY</b>	<b>VÝPARNÁ VÝŠKA</b>	<b>INTENZITA EVAPORACE</b>	<b>KUMULATIVNÍ EVAPORACE</b>	<b>POZNÁMKA</b>
<b>SELČ</b>	<b>[g]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>	
22:00	878,5	52,90	-	-	-	za tmy
4:50	876,3	52,769	-	-	0,000	ve stínu
6:39	875,9	52,746	0,023	0,013	0,023	ve stínu
8:03	874,5	52,661	0,085	0,061	0,108	ve stínu
9:25	870,2	52,402	0,259	0,189	0,367	na slunci
10:15	865,5	52,119	0,283	0,340	0,650	na slunci
11:23	859,2	51,740	0,379	0,335	1,030	na slunci
12:19	852,6	51,342	0,397	0,426	1,427	na slunci
13:14	845,7	50,927	0,416	0,453	1,843	na slunci
14:17	835,6	50,318	0,608	0,579	2,451	na slunci
15:12	826,7	49,783	0,536	0,585	2,987	na slunci
16:16	816,7	49,180	0,602	0,565	3,589	na slunci
17:14	809,2	48,729	0,452	0,467	4,041	na slunci
18:18	802,9	48,349	0,379	0,356	4,420	na slunci
19:27	794,9	47,868	0,482	0,419	4,902	na slunci
20:53	790,3	47,591	0,277	0,193	5,179	na slunci

Tab. 12: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP6 umístěného u jižního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

<b>STANOVIŠTĚ EP6</b>		
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE</b>	<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)</b>	<b>EVAPORAČNÍ ÚHRN</b>
<b>[mm/h]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>
0,216	0,323	5,179



Obr. 11: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP6 umístěného u jižního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.



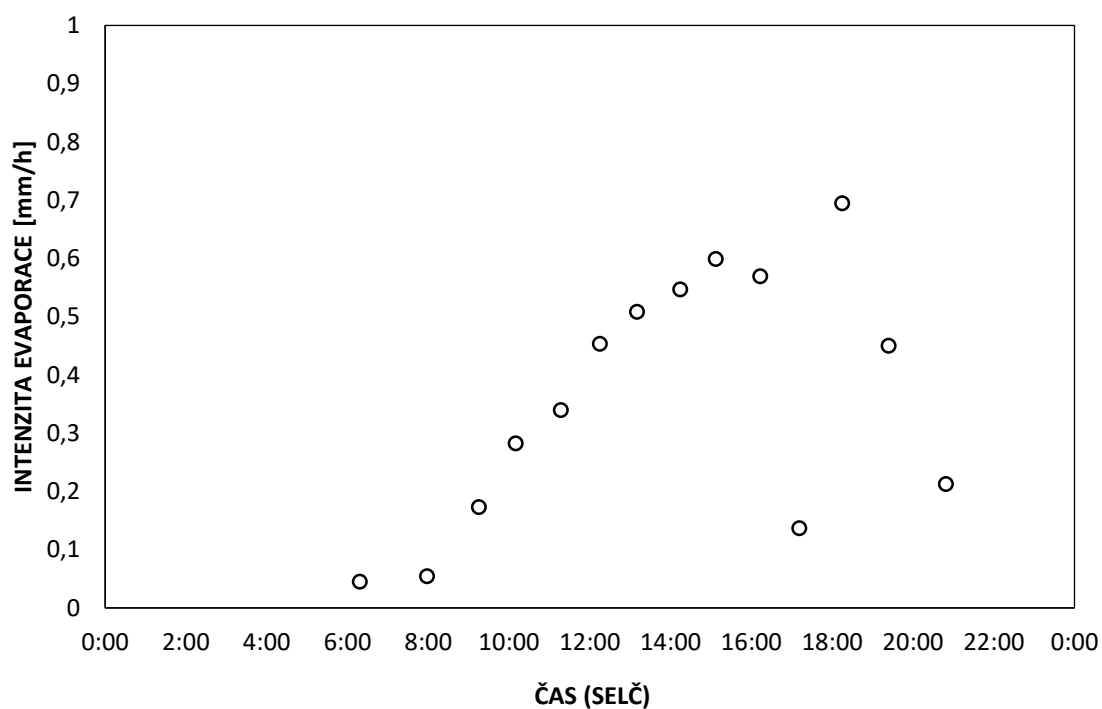
Obr. 12: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP6 umístěného u jižního okraje střechy (cca 25 cm od něj) poblíž měření TDR.

Tab. 13: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP7 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) u meteosloupu.

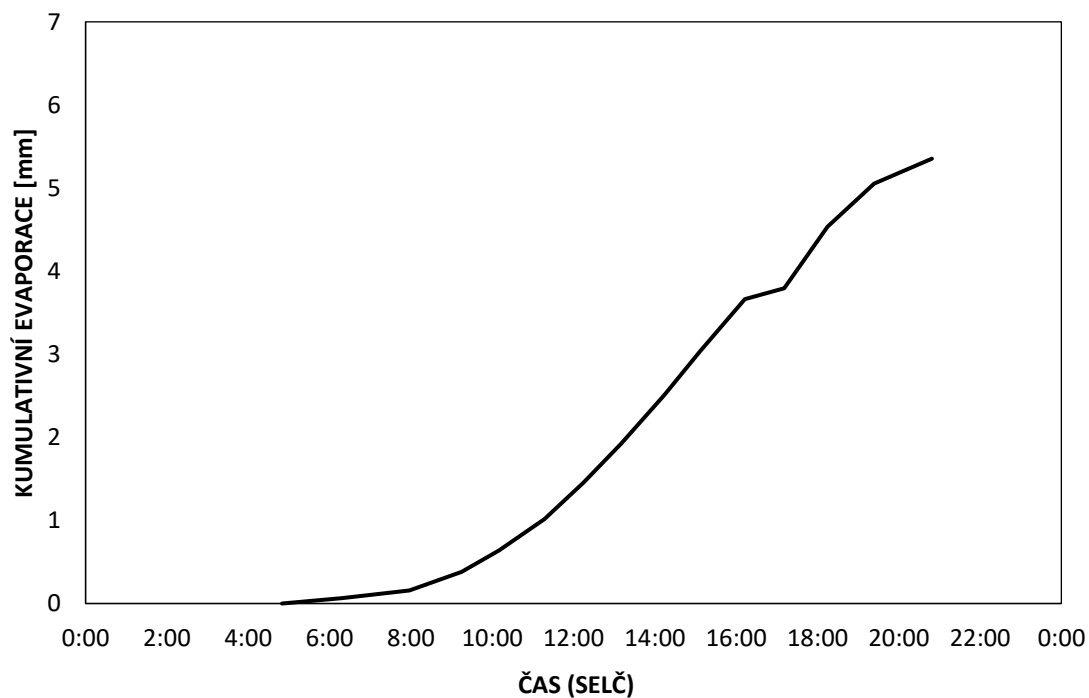
STANOVIŠTĚ EP7							
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	TEPLOTA	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	[°C]	
22:00	881,3	53,12	-	-	-	-	za tmy
4:50	879,4	53,004	-	-	0,000	-	ve stínu
6:18	878,3	52,937	0,066	0,045	0,066	-	ve stínu
7:58	876,8	52,847	0,090	0,054	0,157	13,5	ve stínu
9:15	873,9	52,625	0,222	0,173	0,379	18,0	na slunci
10:10	869,6	52,366	0,259	0,282	0,638	19,0	na slunci
11:17	863,3	51,987	0,379	0,340	1,017	20,5	na slunci
12:15	857,1	51,548	0,438	0,454	1,456	22,0	na slunci
13:10	849,3	51,082	0,466	0,509	1,922	25,0	na slunci
14:14	839,6	50,499	0,583	0,547	2,505	25,0	na slunci
15:07	829,8	49,969	0,529	0,599	3,035	26,0	na slunci
16:13	819,4	49,343	0,626	0,569	3,661	23,5	na slunci
17:11	817,2	49,210	0,132	0,137	3,793	22,5	na slunci
18:15	804,9	48,470	0,741	0,694	4,534	22,0	na slunci
19:24	796,3	47,952	0,518	0,450	5,052	21,0	na slunci
20:49	791,3	47,651	0,301	0,213	5,353	18,0	na slunci

Tab. 14: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP7 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) u meteosloupu.

STANOVIŠTĚ EP7		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,223	0,335	5,353



Obr. 13: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP7 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) u meteosloupu.



Obr. 14: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP7 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) u meteosloupu.

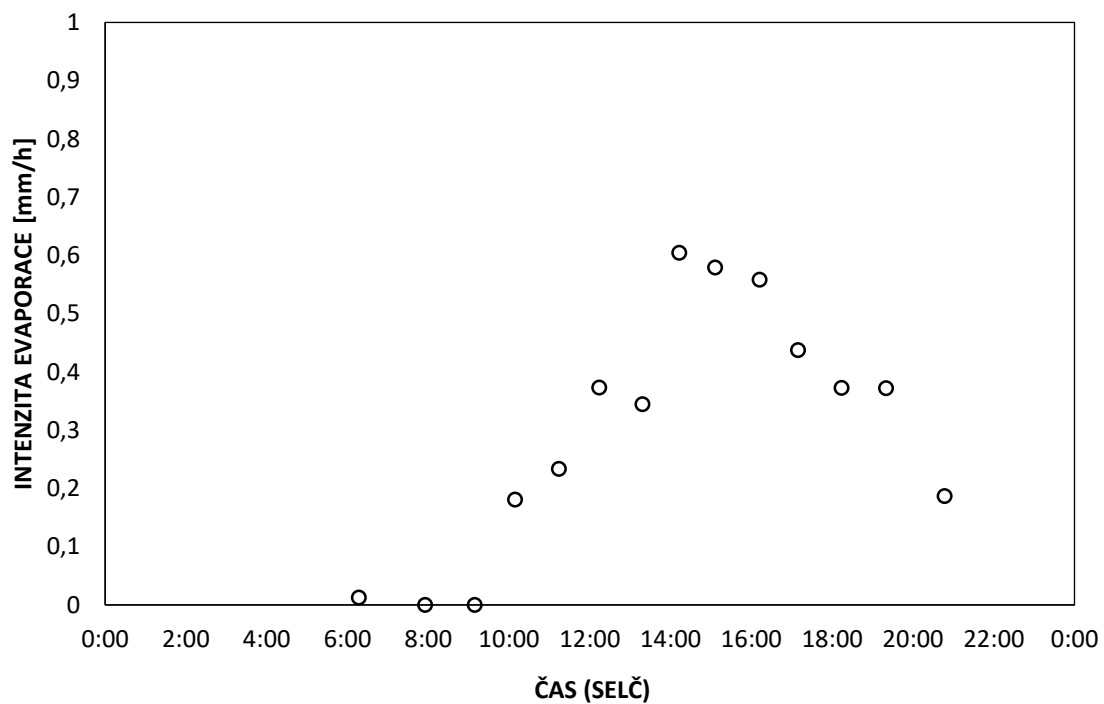


Tab. 15: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP8 umístěného v severo-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

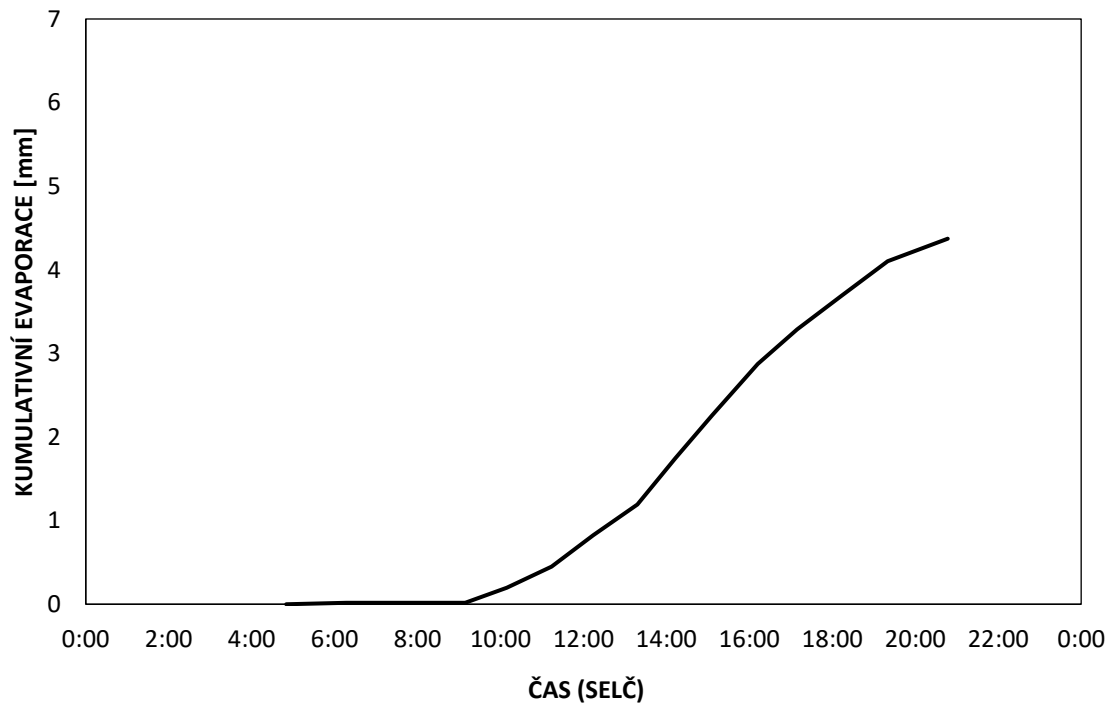
STANOVIŠTĚ EP8						
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	883,4	53,20	-	-	-	za tmy
4:50	881,0	53,055	-	-	0	ve stínu
6:17	880,7	53,037	0,018	0,012	0,018	ve stínu
7:55	880,7	53,037	0,000	0,000	0,018	ve stínu
9:09	880,7	53,037	0,000	0,000	0,018	na slunci
10:09	877,7	52,856	0,181	0,181	0,199	na slunci
11:14	873,5	52,603	0,253	0,233	0,452	na slunci
12:14	867,3	52,230	0,373	0,373	0,825	na slunci
13:18	861,2	51,862	0,367	0,344	1,192	na slunci
14:13	852,0	51,308	0,554	0,604	1,746	na slunci
15:06	843,5	50,797	0,512	0,579	2,258	na slunci
16:12	833,3	50,182	0,614	0,558	2,872	na slunci
17:09	826,4	49,767	0,416	0,437	3,288	na slunci
18:14	819,7	49,363	0,403	0,372	3,691	na slunci
19:20	812,9	48,954	0,409	0,372	4,101	na slunci
20:47	808,4	48,683	0,271	0,187	4,372	na slunci

Tab. 16: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP8 umístěného v severo-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

STANOVIŠTĚ EP8		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,182	0,274	4,372



Obr. 15: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP8 umístěného v severo-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).



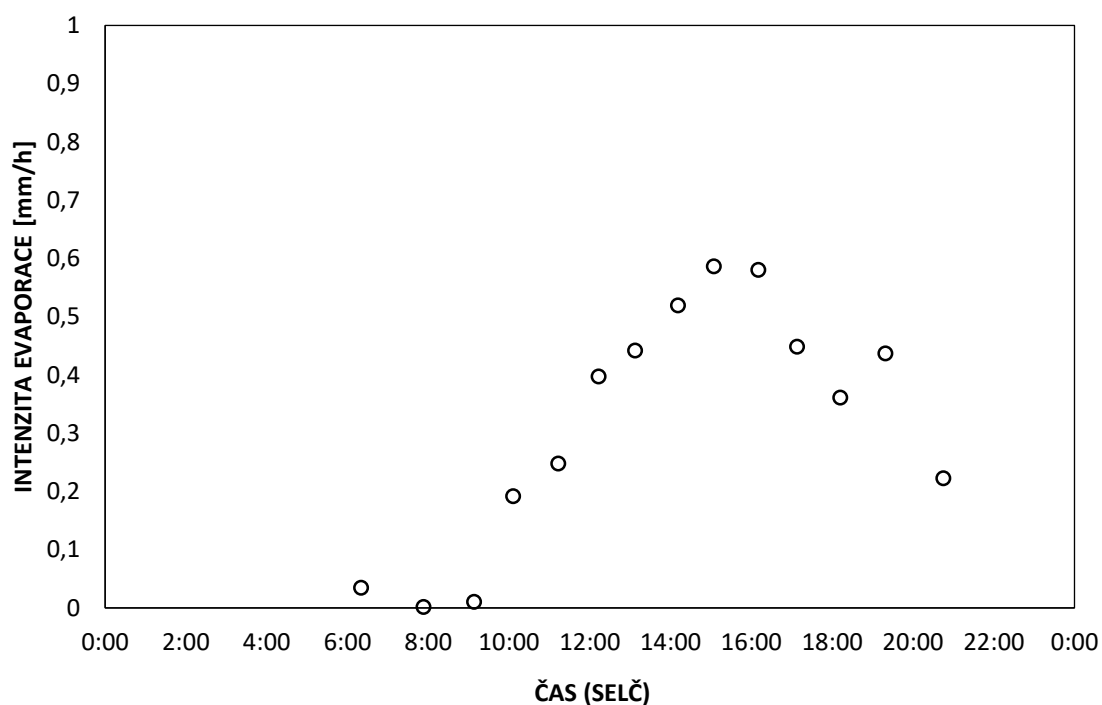
Obr. 16: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP8 umístěného v severo-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

Tab. 17: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP9 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod východním vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

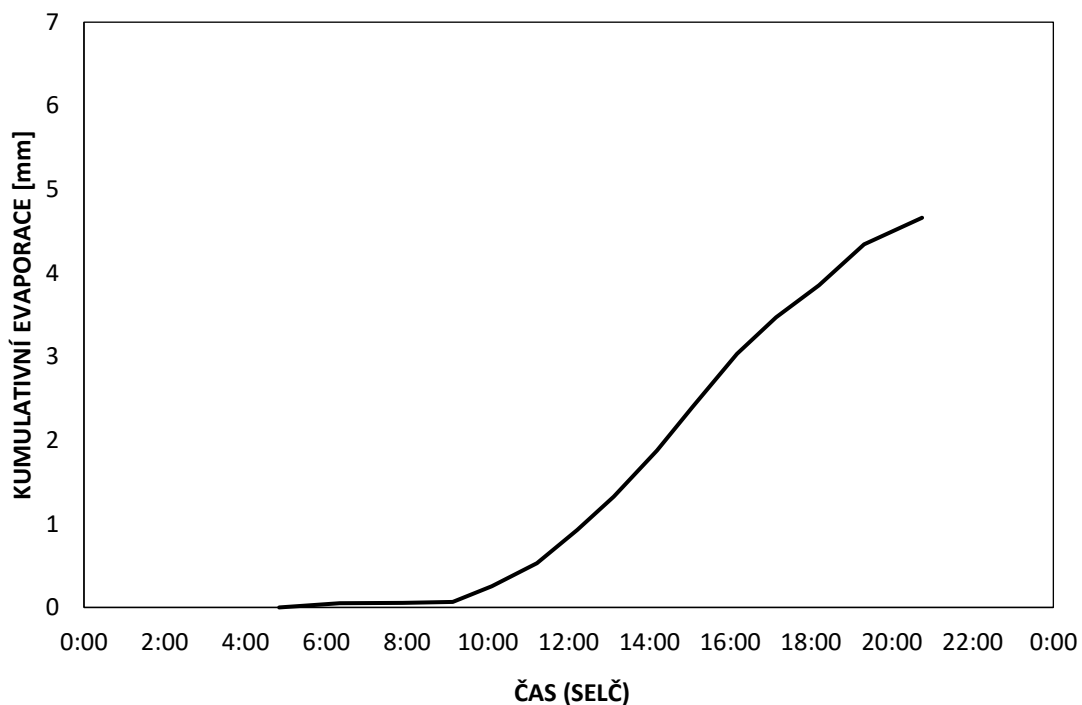
STANOVIŠTĚ EP9						
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	
22:00	882,6	53,150	-	-	-	za tmy
4:50	880,8	53,042	-	-	0	ve stínu
6:20	880,0	52,990	0,052	0,035	0,052	ve stínu
7:53	879,9	52,987	0,002	0,002	0,054	ve stínu
9:08	879,7	52,974	0,013	0,011	0,067	na slunci
10:06	876,6	52,789	0,185	0,192	0,253	na slunci
11:13	872,0	52,512	0,277	0,248	0,530	na slunci
12:13	865,4	52,114	0,397	0,397	0,927	na slunci
13:07	858,8	51,717	0,397	0,442	1,325	na slunci
14:11	849,6	51,163	0,554	0,519	1,879	na slunci
15:04	841,0	50,645	0,518	0,586	2,397	na slunci
16:10	830,4	50,007	0,638	0,580	3,035	na slunci
17:08	823,2	49,573	0,434	0,449	3,469	na slunci
18:12	816,8	49,188	0,385	0,361	3,854	na slunci
19:19	808,7	48,700	0,488	0,437	4,342	na slunci
20:45	803,4	48,381	0,319	0,223	4,661	na slunci

Tab. 18: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP9 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod východním vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

STANOVIŠTĚ EP9		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,194	0,293	4,661



Obr. 17: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP9 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod východním vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).



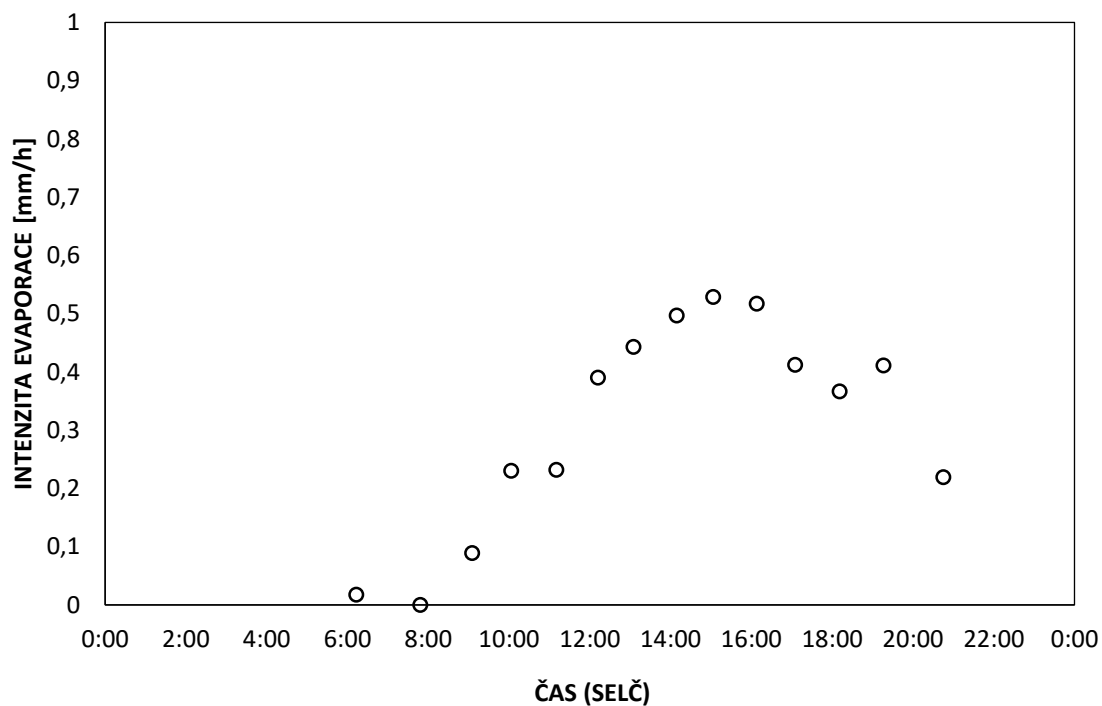
Obr. 18: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP9 umístěného ve střední linii střechy v západovýchodním směru (tj. cca 6 m od krajů) pod východním vyvýšením střechy (cca 25 cm od něj).

Tab. 19: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP10 umístěného v jiho-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

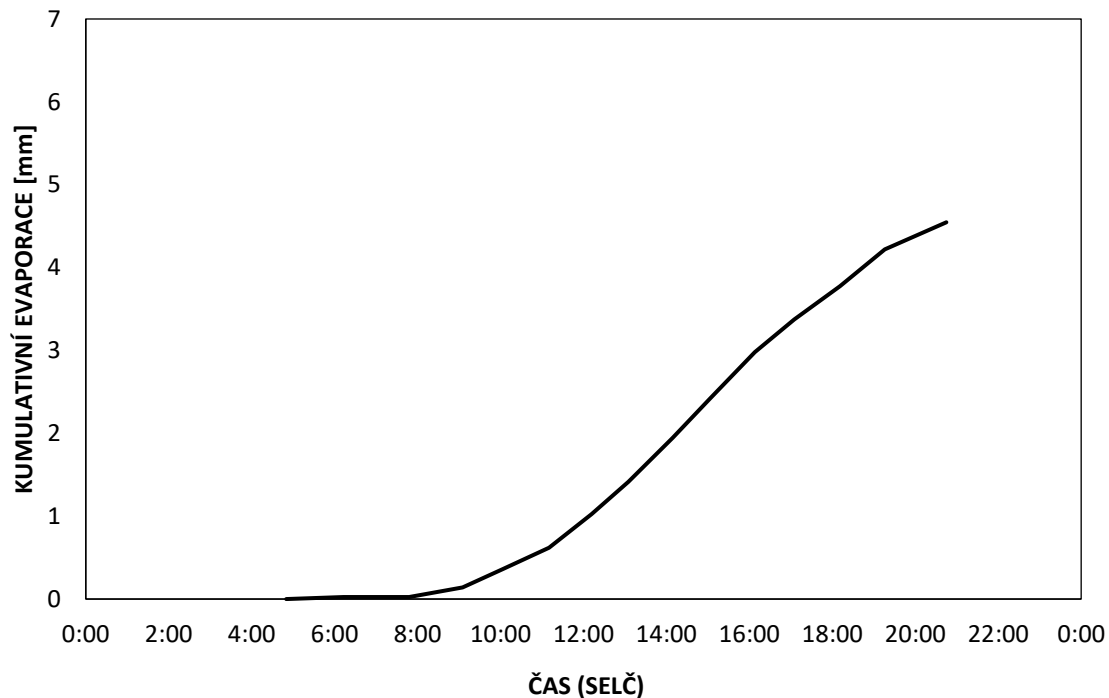
<b>STANOVIŠTĚ EP10</b>						
<b>ČAS MĚŘENÍ</b>	<b>HMOTNOST VODY</b>	<b>ÚROVEŇ HLADINY</b>	<b>VÝPARNÁ VÝŠKA</b>	<b>INTENZITA EVAPORACE</b>	<b>KUMULATIVNÍ EVAPORACE</b>	<b>POZNÁMKA</b>
<b>SELČ</b>	<b>[g]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>	
22:00	886,7	53,396	-	-	-	za tmy
4:50	884,5	53,263	-	-	0	ve stínu
6:13	884,1	53,239	0,024	0,017	0,024	ve stínu
7:48	884,1	53,239	0,000	0,000	0,024	ve stínu
9:05	882,2	53,125	0,114	0,089	0,139	na slunci
10:03	878,5	52,902	0,223	0,230	0,361	na slunci
11:10	874,2	52,643	0,259	0,232	0,620	na slunci
12:12	867,5	52,239	0,403	0,390	1,024	na slunci
13:05	861,0	51,848	0,391	0,443	1,415	na slunci
14:09	852,2	51,318	0,530	0,497	1,945	na slunci
15:03	844,3	50,842	0,476	0,529	2,421	na slunci
16:08	835,0	50,282	0,560	0,517	2,981	na slunci
17:05	828,5	49,891	0,391	0,412	3,372	na slunci
18:11	821,8	49,487	0,403	0,367	3,776	na slunci
19:16	814,4	49,042	0,446	0,411	4,221	na slunci
20:45	809,0	48,717	0,325	0,219	4,546	na slunci

Tab. 20: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP10 umístěného v jiho-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

<b>STANOVIŠTĚ EP10</b>		
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE</b>	<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)</b>	<b>EVAPORAČNÍ ÚHRN</b>
<b>[mm/h]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>
0,189	0,286	4,546



Obr. 19: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP10 umístěného v jiho-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).



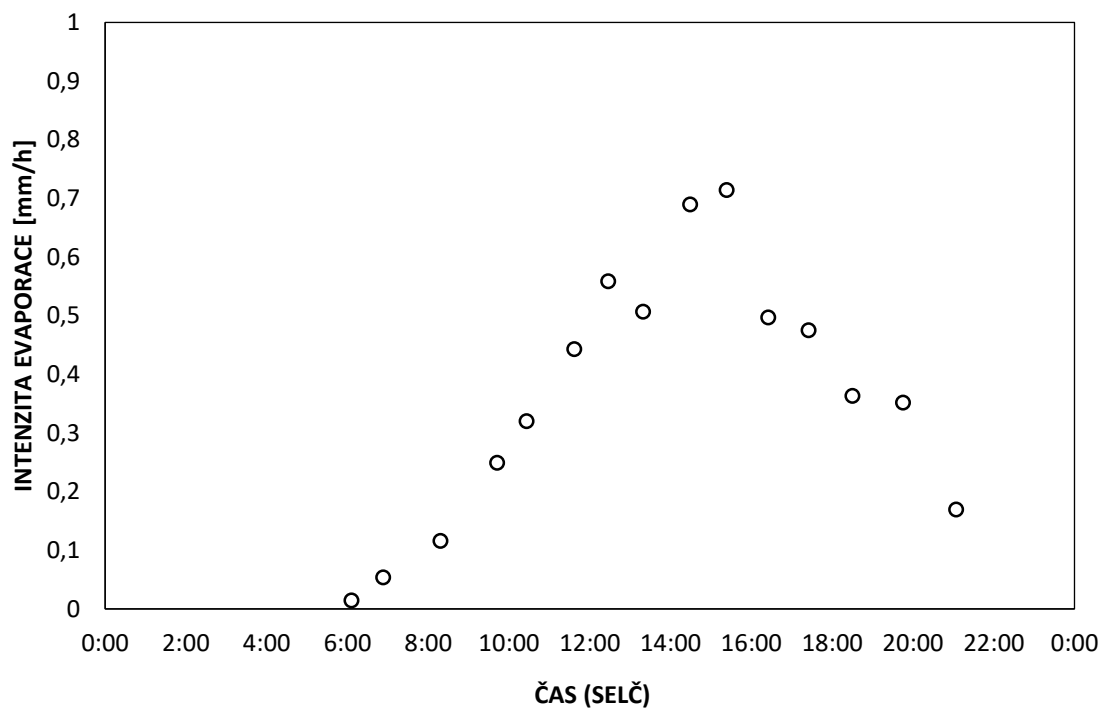
Obr. 20: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP10 umístěného v jiho-východním rohu zelené střechy (cca 25 cm od něj).

Tab. 21: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP11 umístěného na dlažbě poblíž provizorního měření radiace.

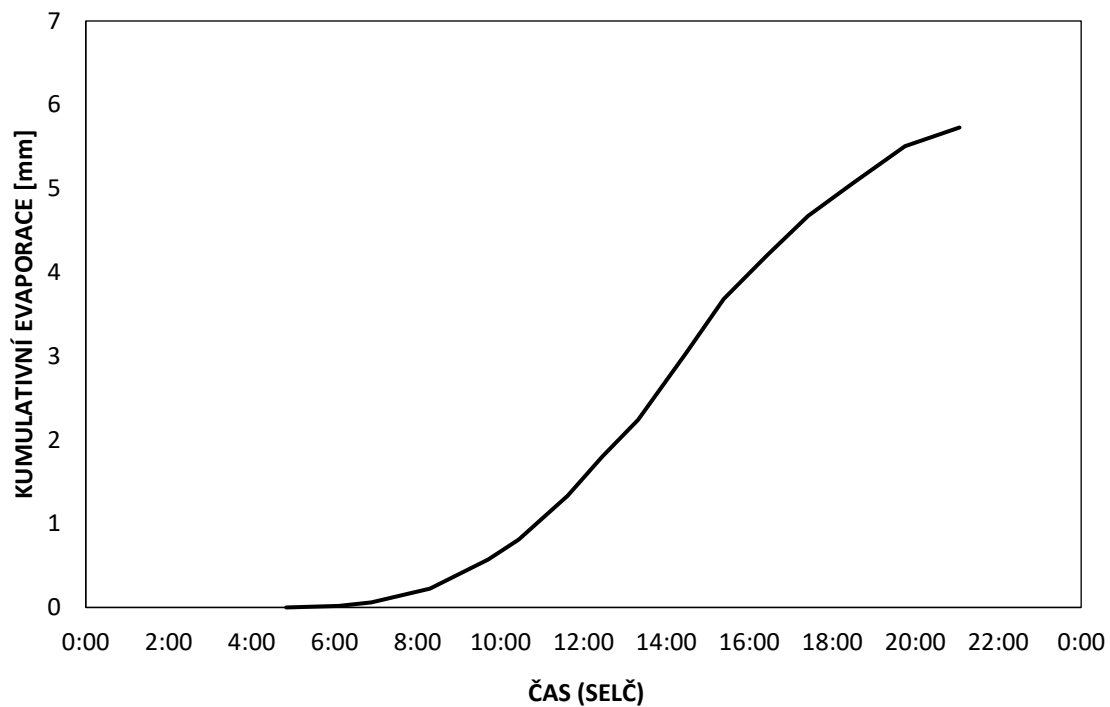
STANOVIŠTĚ EP11							
ČAS MĚŘENÍ	HMOTNOST VODY	ÚROVEŇ HLADINY	VÝPARNÁ VÝŠKA	INTENZITA EVAPORACE	KUMULATIVNÍ EVAPORACE	TEPLOTA	POZNÁMKA
SELČ	[g]	[mm]	[mm]	[mm/h]	[mm]	[°C]	
22:00	884,4	53,337	-	-	-	-	za tmy
4:50	882,2	53,204	-	-	0,000	-	ve stínu
6:06	881,9	53,186	0,018	0,014	0,018	9,0	ve stínu
6:53	881,2	53,144	0,042	0,054	0,060	10,0	ve stínu
8:18	879,0	52,980	0,164	0,116	0,225	14,0	na slunci
9:42	874,0	52,631	0,349	0,249	0,574	19,5	na slunci
10:26	870,1	52,396	0,235	0,320	0,808	20,5	na slunci
11:37	861,4	51,872	0,524	0,443	1,332	22,0	na slunci
12:27	854,7	51,407	0,465	0,558	1,798	24,5	na slunci
13:19	847,4	50,968	0,439	0,507	2,237	26,5	na slunci
14:29	835,2	50,163	0,804	0,689	3,041	28,0	na slunci
15:23	824,5	49,521	0,643	0,714	3,684	28,0	na slunci
16:25	814,8	49,007	0,514	0,497	4,198	26,0	na slunci
17:25	806,9	48,532	0,475	0,475	4,673	26,0	ve stínu
18:30	799,4	48,139	0,393	0,363	5,066	22,0	ve stínu
19:45	792,1	47,699	0,440	0,352	5,505	22,0	ve stínu
21:04	788,4	47,476	0,223	0,169	5,728	17,2	ve stínu

Tab. 22: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP11 umístěného na dlažbě poblíž provizorního měření radiace.

STANOVIŠTĚ EP11		
PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE	PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za denního slunečního svitu)	EVAPORAČNÍ ÚHRN
[mm/h]	[mm/h]	[mm]
0,239	0,353	5,728



Obr. 21: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP11 umístěného na dlažbě poblíž provizorního měření radiace.



Obr. 22: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP11 umístěného na dlažbě poblíž provizorního měření radiace.

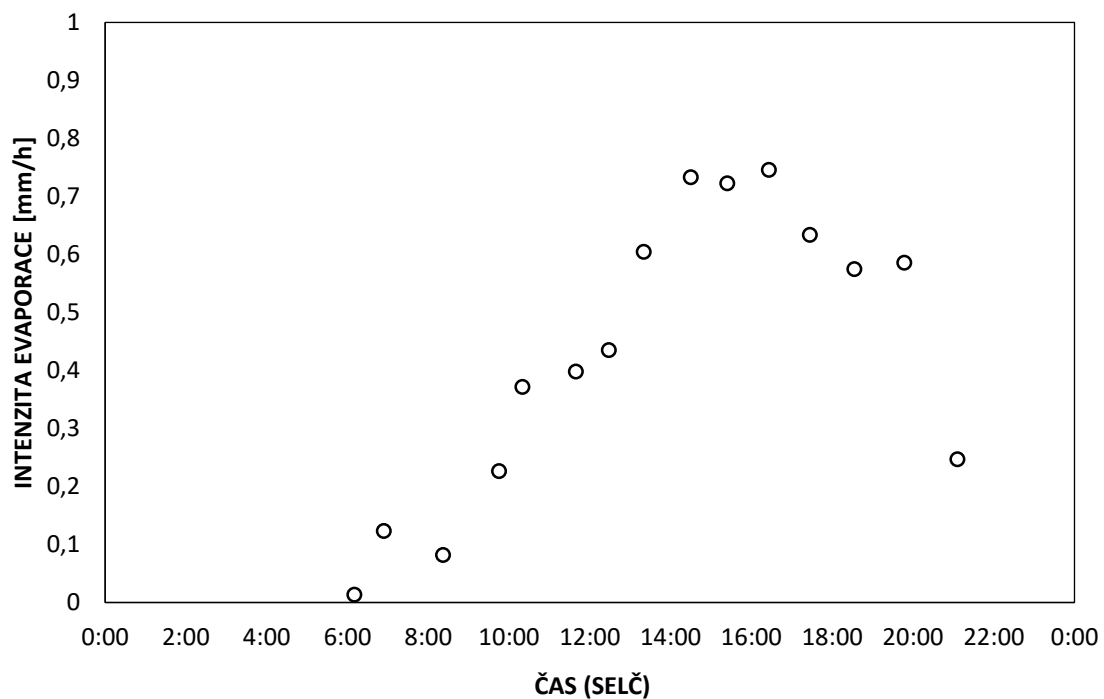


Tab. 23: Měřené hmotnosti vody a vyhodnocení evaporačního experimentu dne 25. června 2015 pro stanoviště EP12 umístěného na dlažbě mezi světlíky.

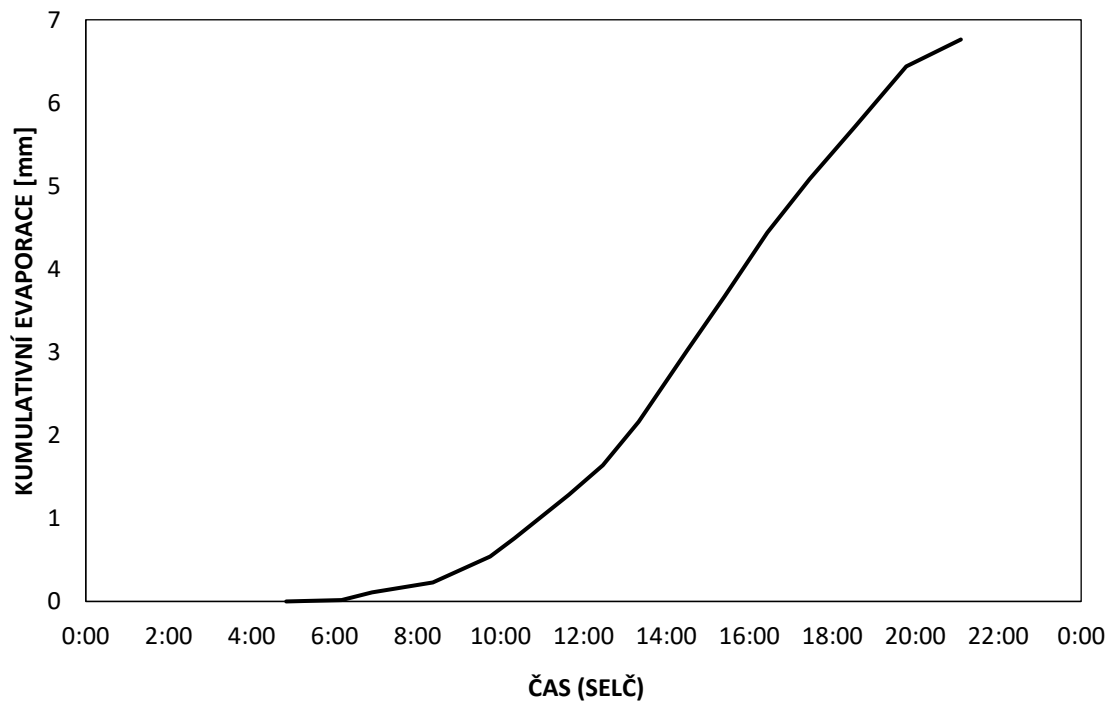
<b>STANOVIŠTĚ EP12</b>						
<b>ČAS MĚŘENÍ</b>	<b>HMOTNOST VODY</b>	<b>ÚROVEŇ HLADINY</b>	<b>VÝPARNÁ VÝŠKA</b>	<b>INTENZITA EVAPORACE</b>	<b>KUMULATIVNÍ EVAPORACE</b>	<b>POZNÁMKA</b>
<b>SELČ</b>	<b>[g]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>	
22:00	888,7	53,516	-	-	-	za tmy
4:50	886,9	53,408	-	-	0	ve stínu
6:10	886,6	53,390	0,018	0,014	0,018	ve stínu
6:54	885,1	53,299	0,090	0,123	0,108	ve stínu
8:22	883,1	53,179	0,120	0,082	0,229	na slunci
9:45	877,9	52,866	0,313	0,226	0,542	na slunci
10:20	874,3	52,649	0,217	0,372	0,759	na slunci
11:39	865,6	52,125	0,524	0,398	1,283	na slunci
12:28	859,7	51,770	0,355	0,435	1,638	na slunci
13:20	851,0	51,246	0,524	0,604	2,162	na slunci
14:30	836,8	50,391	0,855	0,733	3,017	na slunci
15:24	826,0	49,740	0,650	0,723	3,667	na slunci
16:26	813,2	48,970	0,771	0,746	4,438	na slunci
17:27	802,5	48,325	0,644	0,634	5,082	na slunci
18:33	792,0	47,693	0,632	0,575	5,715	na slunci
19:47	780,0	46,970	0,723	0,586	6,437	na slunci
21:06	774,6	46,645	0,325	0,247	6,763	na slunci

Tab. 24: Vypočtené denní hodnoty evaporace a evaporační úhrn dne 25. června 2015 pro stanoviště EP12 umístěného na dlažbě mezi světlíky.

<b>STANOVIŠTĚ EP12</b>		
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE</b>	<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ EVAPORACE (za dobu denního slunečního svitu)</b>	<b>EVAPORAČNÍ ÚHRN (za dobu denního slunečního svitu)</b>
<b>[mm/h]</b>	<b>[mm/h]</b>	<b>[mm]</b>
0,282	0,416	6,763



Obr. 23: Průběh intenzity evaporace [mm/h] 25. června 2015 pro stanoviště EP12 umístěného na dlažbě mezi světlíky.



Obr. 24: Průběh kumulativní evaporace [mm] 25. června 2015 pro stanoviště EP12 umístěného na dlažbě mezi světlíky.