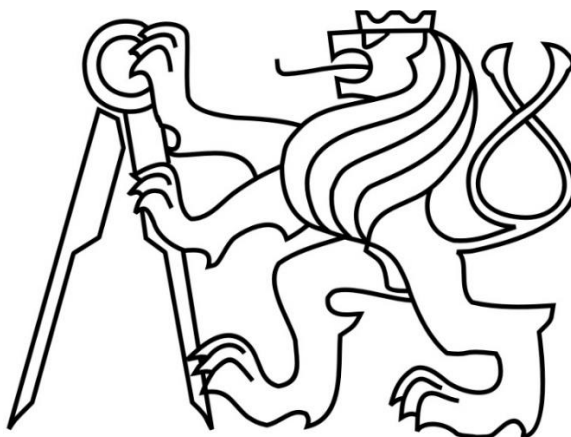


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odtok z experimentálních ploch extenzivních zelených střech

Runoff from extensive green roof experimental beds

Markéta Frídová

2019

Vedoucí práce: Doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Fřídová</u>	Jméno: <u>Markéta</u>	Osobní číslo: <u>458946</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Odtok z experimentálních ploch extenzivních zelených střech</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Runoff from extensive green roof experimental beds</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši na téma zelených střech se zaměřením na jejich odtokové poměry. Na experimentálních ploškách zelených střech na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze, proveďte recalibraci průtokoměrů. Proveďte analýzu srážkoodtokových událostí na zvolených zkušebních plochách charakterizovaných vegetačním krytem a typem použitého substrátu. Zjistěte odtokové součinitele vybraných srážkových epizod. Výsledky diskutujte.	
Seznam doporučené literatury: FLL (2008): Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn. Články v časopisech indexovaných v databázi WOS.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>28.2.2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>26.5.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

<u>28.2.2019</u>	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Michala Sněhoty, Ph.D.

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

V Praze dne

.....

Markéta Frídová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Michalovi Sněhotovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a cenné rady při zpracování závěrečné práce.

Dále děkuji Ing. Jitce Hanzlíkové za poskytnutí podkladů ke zpracování dat.

Tato práce byla vytvořena v rámci projektu Grantové agentury České Republiky č. 17-21011S ve spolupráci s Univerzitním centrem energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou a zhodnocením srážkoodtokových vlastností na čtyřech experimentálních zkušebních plochách umístěných na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradu. Zkušební plochy se liší typem použitého substrátu a vegetace. Pro zhodnocení byla použita naměřená data srážek, odtoku, vlhkostí substrátu a teplot ve sledovaném období od 24. 10. 2018 do 27. 3. 2019. Na zkušebních plochách byla provedena kalibrace průtokoměrů a byl vypočten kalibrační koeficient. Odtokové vlastnosti experimentálních ploch byly porovnány v závislosti na srážkových událostech daného období a následně byl vypočten odtokový součinitel. Dále byl zhodnocen teplotní a vlhkostní režim jednotlivých segmentů a jejich vzájemné porovnání. Z výsledků analýzy dat plyne, že největší odtok byl naměřen na zkušební ploše se substrátem BB Com, osázeným řízkou rozchodníků a největší retenční schopnost byla zaznamenána na zkušební ploše se substrátem BB Com s rozchodníkovým kobercem a na zkušební ploše se substrátem Acre, osázeným rozchodníkovými řízkou. V práci jsou zahrnuty teoretické poznatky z dané problematiky a rešerše týkající se odtokových poměrů zelených střech.

Klíčová slova: zelená střecha, vegetace, substrát, retence, odtok, srážky, vodní režim

Abstract

This Bachelor's thesis deals with analysis and evaluation of rainwater runoff from four green roof test beds situated on the green roof of University Centre for Energy Efficient Buildings in Buštěhrad. The test beds differ in type of used substrate and vegetation. Measured data of rainwater, runoff, moisture of substrates and temperatures during the observed period between 10/24/2018 to 03/27/2019 were used for evaluation. Calibration of flowmeters was performed on the test beds and then calibration coefficient was calculated. Runoff from test beds were compared with rainwater events during the measured period and then runoff coefficient was calculated. Afterwards, the water and thermal regime of the test beds were evaluated and compared. The results of the analysis show that the highest runoff was found in the test bed with BB Com substrate, planted with sedum cutting and the highest retention ability occurred in case of the test bed with BB Com substrate, covered by sedum carpet and the test bed with Acre substrate, planted with sedum cutting. This thesis also includes theoretical background for this topic, as well a research on runoff regime of green roofs.

Key words: green roof, vegetation, substrate, retention, runoff, precipitation, water regime

Obsah

1. Úvod.....	- 9 -
2. Teoretická část.....	- 10 -
2.1. Úvod.....	- 10 -
2.2. Vlhkost půdy.....	- 10 -
2.3. Infiltrace.....	- 11 -
2.3.1. Metoda Green-Ampt.....	- 12 -
2.4. Evapotranspirace.....	- 13 -
2.5. Hydraulické charakteristiky.....	- 13 -
2.5.1. Hydraulická vodivost.....	- 13 -
2.5.2. Potenciál půdní vody.....	- 15 -
2.5.3. Retenční čára vlhkosti.....	- 16 -
3. Rešerše.....	- 17 -
3.1. Úvod.....	- 17 -
3.2. Funkce zelených střech.....	- 17 -
3.3. Rozdělení zelených střech.....	- 18 -
3.4. Skladba zelených střech.....	- 19 -
3.5. Faktory ovlivňující retenci a odtok srážkové vody ze zelených střech.....	- 21 -
4. Metody a materiál.....	- 24 -
4.1. Popis experimentálních ploch.....	- 24 -
4.1.1. Konstrukce zkušebních ploch.....	- 24 -
4.1.2. Substrát ACRE.....	- 25 -
4.1.3. Substrát BB Com.....	- 26 -
4.1.4. Rozchodníkový koberec.....	- 27 -
4.1.5. Řízky rozchodníků.....	- 28 -
4.2. Lokalita a klimatické podmínky.....	- 28 -

4.3. Postupy měření	- 29 -
4.4. Metody analýzy dat	- 30 -
4.5. Kalibrace průtokoměrů	- 30 -
5. Výsledky a diskuze.....	- 32 -
5.1. Srážkové epizody ve zkoumaném období	- 32 -
5.2. Odtokové vlastnosti zelených ploch.....	- 33 -
5.3. Teplotní režim	- 36 -
5.4. Vlhkost substrátu	- 40 -
5.5. Hmotnost a zásoba vody v segmentu	- 44 -
5.6. Určení odtokového součinitele	- 46 -
6. Závěr.....	- 48 -
7. Literatura	- 50 -
7.1. Odborná literatura.....	- 50 -
7.2. Internetové zdroje	- 52 -
8. Seznam obrázků a grafů	- 53 -
8.1. Seznam obrázků	- 53 -
8.2. Seznam grafů.....	- 53 -
9. Seznam tabulek.....	- 54 -

1. Úvod

Se zvyšující se urbanizací a rozrůstáním měst vznikají další zastavěné plochy a zanikají území přírodního charakteru. Zastavěné plochy z antropogenních materiálů mají schopnost akumulovat teplo ze slunečního záření a sálat ho zpět do okolí. Zvyšováním teplot ve městech vznikají tzv. tepelné ostrovy. Při srážkových událostech zpevněné plochy nedokáží vodu zadržovat, a ta rychle odtéká do kanalizační sítě. S rostoucí intenzitou srážky stoupají průtoky v kanalizační síti v době odtoku. Budování zelených střech napomáhá k retenci srážkové vody a oddálení odtoku vody do kanalizační sítě. Srážková voda se z části zachytí na vegetaci, nebo se infiltruje do substrátu zelené střechy. Infiltrovaná voda, která neodteče ze zelené střechy, se včetně intercepce vypaří pomocí evapotranspirace rostlin zpět do ovzduší. Tento jev příznivě ovlivňuje mikroklima, zvyšuje vlhkost a snižuje teplotu okolního vzduchu.

U zelených střech dochází k výparu vody z půdy do ovzduší, což příznivě ovlivňuje klima ve městech. Výstavba zelených ploch by měla být ve městech více podporována, aby došlo k jejímu rozšíření a stala se běžnou součástí městské infrastruktury. Pro zlepšení vlastností zelených střech je třeba vybrat vhodnou skladbu střechy včetně substrátu a vegetace.

Tato bakalářská práce sestává z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou uvedeny základní teoretické znalosti v oblasti vlhkosti půdy, infiltrace, evapotranspirace, hydraulické vodivosti, potenciálu půdní vody a retenční čáry vlhkosti. Následuje rešerše zabývající funkcí, rozdělením a skladbou zelených střech a faktory, které ovlivňují retenci a odtok srážkové vody ze zelených střech. Praktická část se zabývá popisem a analýzou experimentálního měření na čtyřech zkušebních plochách zelených střech, lišících se typem substrátu a způsobem založení vegetace. Experimentální plochy jsou umístěny na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradu. Cílem práce je porovnat odtokové poměry na jednotlivých plochách, především součinitele odtoku. Dále jsou znázorněny průběhy vlhkostí a teplot ve zkušebních plochách. V závěru jsou zhodnoceny jednotlivé výstupy práce a porovnány vlastnosti použitých typů substrátů a vegetace.

2. Teoretická část

2.1. Úvod

V této kapitole jsou uvedeny základní teoretické znalosti, související s danou problematikou zelených střech. Zabývá se vlhkostí půdy a jejím měření, infiltrací vody do půdy, včetně Green-Amptovy metody a evapotranspirací. Dále se zabývá hydraulickou vodivostí, potenciálem půdní vody a retenční čarou vlhkosti.

2.2. Vlhkost půdy

Vlhkost půdy vyjadřuje množství vody obsažené v půdě, je to bezrozměrná veličina a často bývá vyjádřena v procentech. Dělíme jí do dvou hlavních kategorií na půdní vlhkost hmotnostní a půdní vlhkost objemovou.

Poměr mezi hmotností vody m_w a hmotností tuhé fáze půdy m_z nazýváme hmotnostní půdní vlhkost a značíme ji písmenem w . Symbolem m_z značíme hmotnost půdy o nulové vlhkosti, prakticky uvažujeme vysušený vzorek půdy při teplotě 105°C (Kutílek, 1978).

$$w = \frac{m_w}{m_z} \quad (2.1)$$

Poměr objemu vody V_w k objemu neporušeného vzorku V_s se nazývá objemová vlhkost půdy a značíme ji písmenem θ (Kutílek, 1978).

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.2)$$

Podle způsobu měření můžeme dělit stanovení vlhkosti půdy na metodu přímou a nepřímou. U přímých metod stanovujeme množství vody v půdě a mezi

nejpoužívanější řadíme metodu gravimetrickou. Při použití této metody se váží vlhký vzorek půdy, který se následně vysuší při teplotě 105°C. Rozdíl hmotnosti vlhké a vysušené půdy se rovná hmotnosti vody obsažené v půdě. Nevýhodou této metody je destruktivní schopnost, časová náročnost a možné komplikace při odběru půdního vzorku (Kutílek et al., 2000).

U nepřímých metod se určuje fyzikální veličina, která je funkčně závislá na půdní vlhkosti (např. elektrický odpor, dielektrická konstanta, zpomalení rychlých elektronů, pohlcování γ -záření, atd.). Odporová metoda funguje na principu závislosti elektrického odporu na vlhkosti. U tenzometrické metody se používá tenzometr pro měření tlakové výšky, která se pomocí retenční čáry přepočítá na vlhkost. Pomocí gamaskopické metody se měří útlum gama záření při prostupu půdním vzorkem v závislosti na hustotě prostředí. Existuje mnoho dalších metod, avšak jedna z častěji používaných, moderních a vysoce přesných metod je TDR – Reflektometrie v časové doméně. Metoda funguje na principu měření rychlosti prostupu vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu podél vodiče umístěného v půdě. Z rychlosti prostupu je vyjádřena dielektrická konstanta, ze které můžeme následně určit vlhkost půdy (Kutílek et al., 2000).

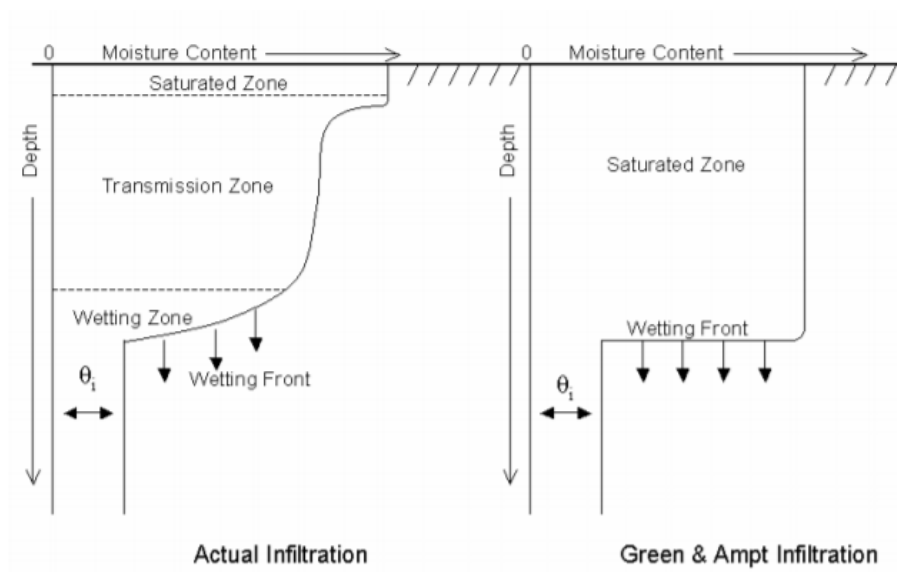
2.3. Infiltrace

Vsakování vody přes topografický povrch se nazývá infiltrace. Množství vody, které se za jednotku času vsákne do půdy, říkáme intenzita vsaku, případně rychlost infiltrace. Voda při vsaku proudí především v nekapilárních pórech, ovšem dochází také k pohybu kapilární vody obsažené v půdě před vsakem (Hillel, 1998).

Intenzita infiltrace má nejvyšší hodnotu na počátku srážky a s časem postupně klesá, až dosáhne konstantní velikosti, která je charakteristická pro daný půdní profil. U vlhké a suché půdy závisí na počáteční vlhkosti půdy, která ovlivňuje množství uzavřeného vzduchu a stabilitu polostabilních agregátů. Voda vsakující se do hloubky před sebou posouvá a stlačuje uzavřený vzduch a v případě, že tlak vzduchu nemá kam v půdě unikat, zvětšuje se a rychlost vsaku vody klesá. Při počáteční vlhké půdě dochází k nižší schopnosti infiltrace a rychlejšímu dosažení konstantní intenzity (Kutílek, 1966).

2.3.1. Metoda Green-Ampt

Tato metoda je častým a jednoduchým postupem k získání odhadu velikosti infiltrace. Hlavním předpokladem Green Amptovy metody je, že nad čelem zvlhčení je konstantní vlhkost a platí zde zákonitosti nasyceného proudění. Green a Ampt zjednodušili čelo zvlhčení (oblast v půdě se strmým nárůstem vlhkosti) v hloubce L_f do obdélníkového tvaru a dělí půdní prostředí na nasycenou a nenasyčenou část (viz. obrázek níže) (Hillel, 1998).



Obrázek 1: Porovnání vlhkosti mezi aktuální infiltrací a Green Amptovou metodou (Převzato z: Lastoria, 2008)

Základ metody vychází z Darcyho rovnice a rychlost infiltrace f je popsána v rovnici (2.3).

$$f = Ke \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F_t} \right) \quad (2.3)$$

Efektivní hydraulická vodivost se zde značí písmenem Ke , symbol ψ popisuje sací tlakovou výšku na čele zvlhčení, $\Delta \theta$ znázorňuje rozdíl mezi počáteční a nasycenou vlhkostí a F_t značí množství srážek v čase t (King et al., 1988).

2.4. Evapotranspirace

Během transpirace dochází k pohybu vody od kořenů rostlin do jejich listů a následně se voda vypařuje zpět do ovzduší. Evaporaci značíme výpar z vodního nebo půdního povrchu. Měření je velice těžké od sebe tyto dvě veličiny rozeznat, proto se častěji určuje celkový výpar z půdy i rostlin, a nazýváme ho evapotranspirace. Aktuální evapotranspirace označuje skutečné množství vody, které se odpaří v reálných podmínkách. Aktuální, skutečnou evapotranspiraci ovlivňuje mnoho faktorů a lze ji obtížně stanovit, proto se určuje její maximální hodnota, tzv. potenciální evapotranspirace. Jedná se o teoretickou hodnotu, při které se uvažuje vlhkost půdy taková, aby u rostlin nedošlo k nedostatku vody. Používá se jako srovnávací hodnota ke skutečné velikosti výparu. Skutečné množství vody, které se vypaří, značíme pojmem aktuální evapotranspirace a závisí na přístupnosti vody pro vegetaci (Kutílek, 1978).

Mezi nejpřesnější rovnice pro výpočet potenciální evapotranspirace ET_0 patří Penman-Monteithova rovnice (2.4), kde R_n je radiační index, G popisuje tok tepla do půdy, T značí průměrnou teplotu vzduchu, u_2 udává rychlost větru ve výšce 2 m nad povrchem, e_s a e_a je sytostní doplněk, Δ značí směrnici křivky a γ popisuje psychrometrickou konstantu (Allen, 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2.4)$$

2.5. Hydraulické charakteristiky

2.5.1. Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost vyjadřuje schopnost porézního prostředí vést vodu. Její velikost závisí na vlastnostech zeminy, především na zrnitosti, velikosti pórů a tvaru zrn. U proudící kapaliny má vliv její hustota a viskozita (Briaud, 2013).

V případě, kdy jsou póry v zemině zcela naplněny vodou, určujeme nasycenou hydraulickou vodivost, která má rozměr rychlosti a značí se písmenem K_s . Můžeme ji stanovit na základě empirických vzorců nebo pomocí měření. Pro výpočet můžeme vycházet z Darcyho zákona, kde q značí objemový tok, K_s je nasycená hydraulická vodivost a $gradH$ značí hydraulický gradient (poměr $\Delta H/L$):

$$q = -K_s gradH \quad (2.5)$$

V laboratorních měřeních se ke zjišťování hydraulické vodivosti používají propustoměry. Pro hrubozrnné až středozrnné zeminy se používají propustoměry s konstantní hladinou, kde se hydraulická vodivost pohybuje v rozmezí od 10^{-1} m/s do 10^{-6} m/s. U jemnozrnných zemin, kde je hydraulická vodivost v rozmezí 10^{-7} m/s až 10^{-11} m/s, se používají propustoměry s klesající hladinou (Briaud, 2013).

Pro měření K_s v terénu se nejčastěji používá dvouválcová, nebo jednoválcová infiltrační metoda založená na výtopové infiltraci. Principem této metody je měření infiltrační rychlosti, kdy po zabudování dvou soustředných válců do země dolijeme určitý objem vody do vnitřního válce a pozorujeme pokles hydraulické výšky v čase (Kutílek et al., 2000). Tuto metodu měření není vhodné provádět na zelených střechách.

Hydraulickou vodivost nenasyčeného prostředí určujeme v případě, kdy část pórů je nasycena vodou a část vzduchem a můžeme ji vyjádřit jako funkci vlhkosti nebo tlakové výšky. Při nižší vlhkosti hydraulická vodivost klesá. Pro její stanovení můžeme vycházet z Darcy-Buckinghamova zákona, kde q vyjadřuje objemový tok, $K(\theta)$ je funkce nenasyčené hydraulické vodivosti a $gradH$ značí hydraulický gradient (Kutílek et al., 2000).

$$q = -K(\theta) gradH \quad (2.6)$$

2.5.2. Potenciál půdní vody

Energie, díky které dochází k transportu vody v půdě, se nazývá vodní potenciál půdy. Hnací silou proudění vody v půdě je rozdíl celkového potenciálu. Potenciál půdní vody může být vyjádřen jako energie za jednotkovou hmotnost vody (J/kg), energie za jednotkový objem vody (nebo také sací tlak) v jednotkách N/m² nebo energie za jednotkovou tíhu (cm). Celkový potenciál značíme symbolem Φ a počítáme ho jako součet gravitačního a vlhkostního potenciálu. Za určitých podmínek, kdy nestačí určit celkový potenciál pouze z těchto dvou složek, připočítáme např. osmotický, pneumatický nebo zátěžový potenciál (Kutílek et al., 2000).

Gravitační potenciál φ_g popisuje vzorec (2.7), kde g je gravitační zrychlení, h je nadmořská výška a m značí hmotnost.

$$\varphi_g = \frac{mgh}{m} = gh \quad (2.7)$$

Vlhkostní potenciál φ_k (zvaný také kapilární) můžeme určit z výpočtu maximální výšky kapilárního vzlínání, kterou dosadíme do rovnice pro gravitační potenciál. Výsledná rovnice má následující tvar, kde σ značí povrchové napětí a r_i vyjadřuje poloměr kapiláry (Kutílek, 1978).

$$\varphi_k = \frac{2\sigma \cos \gamma}{r_i \rho_w} \quad (2.8)$$

Pro měření vlhkostního potenciálu na zelených střechách je vhodné použít dielektrické senzory, které měří vlhkost mezi dvěma porézními keramickými destičkami. Naměřené hodnoty vlhkostí jsou pomocí známé retenční křivky keramického materiálu převedeny na vlhkostní potenciál (www.metergroup.com, 2017).

2.5.3. Retenční čára vlhkosti

Retenční čára vlhkosti je základní hydraulickou charakteristikou a vyobrazuje vztah mezi vlhkostí půdy a vlhkostním potenciálem (sacím tlakem nebo tlakovou výškou). Průběh křivky závisí na mnoha faktorech a vlastnostech půdy, a proto je třeba ji určit pro každou půdu zvlášť. Vlhkostní potenciál s vyššími hodnotami se vynáší v logaritmickém měřítku a celý graf se zobrazuje v měřítku semilogafickém. Pro tento způsob provedení se hodnoty značí pF a vykreslená čára se nazývá pF čára. U retenční čáry dochází k výrazné hysterezi, kdy je průběh retenční křivky pro odvodňování vlhké půdy odlišný než průběh křivky pro zvlhčování půdy ze suchého stavu. Hysterezi především ovlivňuje uzavírání vzduchu nebo vody ve slepých pórech a hodnota smáčecího úhlu při vstupu vody do suchého prostředí a při ústupu vody z vlhkého prostředí. Pro vyjádření retenční křivky se používá mnoho empirických rovnic, např. rovnice pro výpočet efektivní vlhkosti, kde θ_s značí nasycenou vlhkost a θ_r reziduální vlhkost (Kutílek et al., 2000):

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.9)$$

Další možné vyjádření efektivní vlhkosti může být použito pomocí Van Genuchtenovy rovnice, kde α , n a m jsou empirické koeficienty a h značí tlakovou výšku (Van Genuchten, 1980):

$$\theta_E = \frac{1}{\{1 + (\alpha|h|^n)\}^m} \quad (2.10)$$

3. Rešerše

3.1. Úvod

V následující kapitole je uvedena rešerše, zabývající se funkcí a rozdělením zelených střech, a jejich skladbou s popsáním jednotlivých vrstev. Nadále se zaměřuje na faktory, které ovlivňují retenci a odtok srážkové vody ze zelených střech.

3.2. Funkce zelených střech

Důsledkem neustále vzrůstající urbanizace je zvyšující se počet nepropustných povrchů na území měst a snižující se počet zelených ploch. Klesání množství zelených ploch způsobuje nárůst teploty a snížení vlhkosti vzduchu v urbanizovaném prostředí. Budování zelených střech poskytuje mnoho výhod (Berndtsson, 2010).

Jednou z hlavních funkcí vegetačních střech je schopnost zadržovat dešťovou vodu a zpomalovat její odtok. U zadržené vody dochází k jejímu odpařování, které napomáhá ke zlepšení mikroklimatu. Přebytečná voda s časovým zpožděním odtéká do kanalizace a díky jejímu redukovanému množství a časové prodlevě mezi srážkou a odtokem snižuje nežádoucí nápor na kanalizační síť a redukuje špičkový odtok (Burian et al., 2016).

Mezi další funkce patří pozitivní účinek na kvalitu ovzduší, zvýšení vlhkosti vzduchu a snížení prašnosti. U vegetační vrstvy na zelených střechách dochází k evapotranspiraci, která snižuje teplotu okolního prostředí. Vegetace zároveň zadržuje a následně vyzařuje méně tepla než antropogenní povrchy a zachycuje nebo odráží část slunečního záření. Dochází také k nižší zvukové odrazivosti, která napomáhá ke snížení hlučnosti. Další funkcí vegetačních střech je ochranné působení na ostatní vrstvy. Vegetační střechy chrání hydroizolaci před mechanickým poškozením nebo před degradací v důsledku UV záření a kolísání teplot (Burian et al., 2016).

3.3. Rozdělení zelených střech

Zelené střechy dělíme podle druhu vegetace do tří kategorií na extenzivní, polointenzivní a intenzivní vegetační střechy. Podstatou extenzivní zelené střechy je vegetace s vysokou autoregulační schopností, aby požadovaná údržba střechy byla minimální. Výběr vegetace ovlivňují stanovištní podmínky, schopnost rostlin regenerace a přizpůsobení se extrémním podmínkám. Mezi nejčastější druhy vegetace se používají mechy, rozchodníky, trávy a byliny. Mocnost souvrství extenzivních střech se pohybuje mezi 60-150 mm a obvykle jsou tyto plochy nepochozí. Polointenzivní zelené střechy tvoří přechodný typ mezi extenzivní a intenzivní střechou. Kromě vegetace pro extenzivní střechy se může použít vegetace s vyššími nároky na skladbu vegetačního souvrství, např.: trvalky, dřeviny nebo keře. Tyto druhy vyžadují nutnost závlahy v sušších obdobích, ostatní péče by měla být minimální, stejně jako u extenzivních střech. Mocnost souvrství se pohybuje v rozmezí 150-350 mm. Vegetaci na intenzivních zelených střechách tvoří rostliny s vysokou estetickou a užitnou hodnotou a vyžadují více údržby. Mezi běžné typy porostů patří travníky, trvalky, užitkové rostliny, keře a stromy. Vegetace vyžaduje vyšší mocnost vegetačního souvrství a obvykle přesahuje 300 mm. Tyto pochozí plochy mají zpravidla pobytovou funkci a mohou být doplněny zpevněnými plochami (Šimečková a Večeřová, 2016).

Mocnost vegetačního souvrství podle různých forem vegetace je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 1: Mocnost souvrství využitelná pro kořenění rostlin u různých způsobů ozelenění a forem vegetace (Zdroj: Šimečková a Večeřová, 2016)

Mocnost souvrství využitelná pro kořenění rostlin v cm		4	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200			
Způsoby ozelenění a formy vegetace	Extenzivní zelené střechy	Rozchodníky	■	■	■																					
		Rozchodníky – trvalky		■	■	■																				
		Rozchodníky – byliny – trávy				■	■	■																		
	Polointenzivní zelené střechy	Trávy – byliny					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Trvalky							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Keře															■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Intenzivní zelené střechy	Malé a střední stromy																								
		Travník																								
		Trvalky																								
		Keře																								
		Malé a střední stromy																								

Mentens et al. (2006) se ve své studii zabývali rozdílem odtokových poměrů mezi intenzivními a extenzivními střechami podle analýzy naměřených dat během let 1987 až 2003 v německých městech (Hannover, Burgdorf, Tübingen a další). Výsledek poukazuje na to, že odtok z intenzivní zelené střechy se pohybuje mezi 65-85 % z celkového srážkového úhrnu a odtok z extenzivní zelené střechy mezi 27-81 % z celkového úhrnu srážek.

3.4. Skladba zelených střech

Skladba zelených střech se může složením jednotlivých vrstev rozlišovat, závisí na typu střechy a její funkci. Na následujícím obrázku je přehledně znázorněno běžné uspořádání vrstev vegetační střechy.



Obrázek 2: Orientační uspořádání vrstev vegetační střechy (Upraveno z: <http://www.ekrost.cz/>)

Důležitou vrstvou vegetačních střech je hydroizolace, která zabraňuje průsaku vody do střešní konstrukce a měla by být odolná proti prorůstání kořenů. Z hlediska ochrany hydroizolace před porušením, musí na ni nezbytně následovat vrstva ochranná, která je tvořená z různých materiálů, např.: rouna z recyklovaných hmot, pěnové rohože, pletené a textilní rohože, polyetylenová nebo polypropylenová rouna (Šimečková et al., 2010).

Na ochrannou vrstvu navazuje vrstva drenážní (odvodňovací), která odvádí přebytečnou vodu ke střešním vtokům. U jednovrstvých extenzivních střech s velmi propustnou vegetační vrstvou je možné drenážní vrstvu vynechat. Mezi běžné materiály této vrstvy řadíme nopovou fólii, drenážní panely (např. desky z recyklátů, hydrofilní minerální vlna), smyčkové rohože nebo sypké hmoty (např. šterk, keramzit, pěnosklo). Následující pomocná hydroakumulační vrstva má schopnost zadržovat vodu pro lepší růst rostlin a zpomalovat dešťový odtok. Nejčastěji se používá na zelených střechách s větším sklonem, kde drenážní vrstva odvádí vodu příliš rychle. Filtrační vrstva zabraňuje vyplavování jemných částic (zejména prachovitých a jílovitých o velikosti menší než 0,063 mm) z vegetační vrstvy do drenážní vrstvy a zamezuje jejímu ucpání. Nejčastěji používaným materiálem pro tuto vrstvu je geotextilie. Vegetační vrstva je tvořena substrátem, ve kterém rostliny koření a jsou zásobovány vodou, živinami a vzduchem. Pro vhodné plnění těchto funkcí se nejčastěji používají sypané substrátové směsi nebo substrátové panely. Mocnost této vrstvy závisí na druhu vegetační střechy a typu vegetace. Pro extenzivní zelené střechy se mocnost pohybuje okolo 60-150 mm. Vegetace je biologicky aktivní vrstva plnící funkci ekologickou (budování nového prostoru pro faunu a flóru), mikroklimatickou (zvyšování vlhkosti prostředí a vyrovnávání extrémních teplot), hygienickou (snižování prašnosti a hlučnosti) a estetickou. Základními způsoby uložení vegetace do vegetační vrstvy jsou výsevy semen, ukládání vegetačních částí (např. řízků) nebo uložení předpěstovaných travních koberců a rohoží (Burian et al., 2016).

Pro vhodné osetí extenzivních střech je důležité, aby byla použita směs semen pro snadnější uchycení. V případě použití vegetačního koberce je nutné dbát na to, aby v koberci došlo k silnému zakořenění rostlin. Celková míra pokrytí vegetací je stanovena nejméně na 80 %. Extenzivní střechy jsou nenáročné na údržbu, avšak je potřeba dbát na pravidelné kontroly, aby střecha správně plnila svou funkci. Mezi běžnou údržbu řadíme občasné odstranění plevelů nebo vyčištění svodných žlabů (FLL, 2018).

3.5. Faktory ovlivňující retenci a odtok srážkové vody ze zelených střech

Retence a odtok srážkové vody ze zelených střech závisí především na vlastnostech zelené střechy a klimatických podmínkách. Část zadržené vody se pomocí evapotranspirace dostane zpět do ovzduší a část vody odeče do kanalizační sítě. Míra retenční schopnosti závisí na několika faktorech, například na výšce vegetační vrstvy, velikosti a intenzitě srážek, vegetaci, sklonu nebo stáří střechy (Berndtsson, 2010).

Simmons et al. (2008) uvádí, že při výzkumu v Texasu na šesti rozlišných extenzivních střechách byly srážkové úhrny menší než 10 mm v půdní vrstvě plně zadrženy. Při srážkovém úhrnu o velikosti srážek 12 mm byla retenční schopnost stanovena na 26-88 % ze srážkového úhrnu v závislosti na různém typu půdních a drenážních vrstev. Při srážce o velikosti 28 mm retenční schopnost klesla na 8-43 % ze srážkového úhrnu a při srážkové události o velikosti 49 mm se pohybovala v rozmezí 13-44 % ze srážkového úhrnu. Pomocí naměřených hodnot došel k závěru, že retenční schopnost nezávisí pouze na velikosti srážky, ale také na průběhu její intenzity.

Nagasea a Dunnett (2011) se ve svém experimentu zabývali také vlivem typu vegetace na retenci a odtok srážkové vody. Měření probíhalo na extenzivních zelených plochách v University of Sheffield ve Velké Británii od září do listopadu v roce 2006. Autoři došli k závěru, že plochy s výsadbou různých typů trav nejlépe redukovaly srážkový odtok. Naopak plochami, ze kterých odteklo nejvíce vody, byly plochy s vysázenými rozhodníky. Zároveň vyhodnotili vzájemný vztah mezi množstvím srážkového odtoku a výškou vegetace a došli k závěru, že vyšší rostliny jsou schopny zadržovat více vody než rostliny nižších rozměrů.

Ve svém článku se Nawaz et al. (2015) zaměřili na vliv délky a intenzity srážek na odtokové vlastnosti vegetační střechy. Jejich studie byla vykonána na extenzivní zelené střeše v lokalitě kampusu University of Leeds. Porovnali například naměřené hodnoty ze dnů s rozlišnými srážkovými epizodami. Z dubnové srážkové události s nižším úhrnem o velikosti 2,04 mm a době trvání 6,77 hod vyhodnotili retenční schopnost na 99,3 %. Zatímco při únorové srážkové události, kdy se srážkový úhrn rovnal 5,1 mm a délce trvání 11,8 hod, vyšla retenční schopnost na 29,3 %. Na základě

jejich měření došli k závěru, že pokud velikost srážkového úhrnu a délka trvání srážky stoupá, retenční schopnost má tendenci klesat.

Dalšími faktory, které mohou ovlivňovat schopnost zadržovat vodu, jsou rozdílné klimatické podmínky a sklon vegetační střechy. Ve svém experimentu v Michiganu Getter et al. (2007) měřili retenční vlastnosti na dvanácti extenzivních plochách za různých klimatických podmínek u střech s rozlišným sklonem. Za relativně suchých podmínek při srážce o úhrnu 42,2 mm byla zjištěna retenční schopnost 68 %, 64 %, 57 % a 58 % při sklonech 2 %, 7 %, 15 % a 25 %. K porovnání vyhodnotili srážku o velikosti 28,7 mm, která se udála 1,5 dne po předchozí srážce, a v tomto případě byla zjištěna retenční schopnost 45 %, 30 %, 27 % a 29 % při sklonech 2 %, 7 %, 15 % a 25 %. Za suchých podmínek a při nižších sklonech byly plochy schopny zadržet více vody. Zároveň při experimentu zaznamenal, že plochy 5 let staré zadržely dvakrát více vody než plochy nové.

Ve svém prvním experimentu v Michiganu se Van Woert et al. (2005) zabývali dopadem srážek o různé intenzitě na velikost a zpoždění odtoku. Měření probíhalo na třech extenzivních plochách, první byla vegetační střecha s rostoucí vegetací, druhá plocha měla stejné složení jako plocha první bez vegetace a třetí plocha obsahovala šterkovou vrstvu o hloubce 2 cm. V tomto pořadí byla zjištěna průměrná retenční schopnost při nižších srážkách 97,9 %, 99,6 % a 84,6 %. U středních srážkových událostí retenční schopnost klesla na 85,7 % u prvních dvou ploch a u třetí plochy na 37,7 %. U srážek s vyšším srážkovým úhrnem zaznamenali nejnižší retenční schopnost 65 %, 52,6 % a 26,3 %. Při měření zpoždění odtoku vegetační plocha s rostoucí vegetací zadržela vodu nejdéle. Ve svém druhém experimentu se zabývali důsledkem změny sklonu a hloubky substrátu na odtokové vlastnosti. Měření probíhalo na experimentálních plochách se sklonem 2 % (hloubka substrátu 2,5 cm a 4 cm) a na plochách se sklonem 6,5 % (hloubka substrátu 4 cm a 6 cm). Plochy se sklonem 2 % a hlubší vrstvou substrátu zadržely více vody než plochy o stejném sklonu s nižší vrstvou substrátu pouze při nižších a středních srážkách. U ploch se sklonem 6,5 % nezaznamenali rozdíl v retenci při odlišných hloubkách substrátu. Celkovou nejlepší retenční schopnost (87 %) zaznamenali u ploch s 2% sklonem a hloubkou substrátu 4 cm.

Jelínková et al. (2015) se ve svém experimentálním měření na dvou zelených plochách na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT během srážkových událostí v září roku 2014 zabývali jejich odtokovými vlastnostmi. Použité segmenty o rozměrech 1x1 m se lišily pouze ve složení vrstvy substrátu (hloubka vrstvy byla v obou případech 5 cm). Substrát v segmentu S1 obsahoval směs ornice a rozdrčeného keramzitu a cihel, segment S2 se skládal ze substrátu pro zelené střechy od společnosti Optigreen a obsahoval více organických látek, zároveň byl lehký a vysoce propustný s dobrou retenční schopností. Díky obsahu organických látek v substrátu došlo u segmentu S1 k většímu vegetačnímu pokrytí (53 %) než u segmentu S2 (8 %). Při analýze naměřených dat zjistili, že při malých srážkách (< 4 mm) se u obou segmentů všechna voda vypařila pomocí evapotranspirace zpět do ovzduší. Při ostatních srážkách se u prvního segmentu průměrný odtok rovnal 38 % z celkové srážky a u druhého segmentu 63 % z celkové srážky.

Ve své studii se Jelínková et al. (2016) zabývali měřením a porovnáním získaných hodnot z betonové střechy a ze stejných ploch jako měření z předchozí uvedené studie. Porovnali naměřenou teplotu mezi betonovou střechou a segmenty S1 a S2 a došli k závěru, že celkově byla teplota na betonovém povrchu v průměru vyšší o 3,5 °C než na vegetačních plochách. Největší teplotní rozdíly byly zaznamenány v substrátu v naměřených teplotách vyšších než 25 °C, při nízkých teplotách pohybujících se kolem 5 až 10 °C vyšly velice podobné hodnoty u segmentu S1 a betonové střechy. Zjistili, že během transpirace se rozchodníky dokáží samy ochlazovat, a proto naměřili teplotu nižší na jejich povrchu než 2 cm pod povrchem substrátu. Zároveň průměrná teplota vyšla vyšší u segmentu S2 z důvodu tmavší barvy substrátu. V celkovém hodnocení došli k závěru, že v substrátu S1 vznikly lepší podmínky pro růst vegetace, a díky tomu vzrostla retenční schopnost, na druhou stranu segment S1 byl díky substrátu náchylnější k zanesení drenážní vrstvy jemnozrnnými částicemi.

4. Metody a materiál

4.1. Popis experimentálních ploch

Naměřená data pochází z testování zkušebních ploch extenzivních zelených střech, které se nachází na zelené střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB) v Buštěhradu. Jedná se o čtyři segmenty lišící se druhem substrátu a typem vegetace. Všechny čtyři segmenty mají stejnou konstrukci a rozměry o velikosti 1 x 1 m a hloubce 0,1 m (Jelínková, 2015; Hanzlíková, 2018)

4.1.1. Konstrukce zkušebních ploch

Hlavní kostru tělesa zkušební plochy tvoří nepropustná ocelová vana, umístěná 25 cm nad zelenou střechou budovy. Podpírají ho čtyři závitové tyče, které umožňují nastavit sklon segmentu v rozmezí 0-5°. V průběhu měření byl sklon segmentu nastaven na 2°. Odtékající voda ze substrátu protéká skrz perforovanou kačírkovou lištu do svodného drenážního žlabu, který vodu usměrňuje do průtokoměru s překlápěcími člunky. Záznamy o jejich překlopení zapisuje datalogger a počítá s objemy v rozmezí 50-65 ml (výpočet objemů po kalibraci viz. kap. 4.5). Svodný žlab i průtokoměr jsou opatřeny ochranným krytem, který zabraňuje přímému dopadu srážek do jejich konstrukce. Konstrukce zkušební plochy je chráněna před vlivem větru pomocí extrudovaného polystyrenu o tl.10 cm. Vnější ochrannou vrstvu segmentu tvoří OSB desky.

V případě zkušební plochy S2 jsou ve všech podpěrných nohách navíc umístěná vážní čidla typu LCMAD-100 (Omega Engineering Ltd., Manchester, UK). Zároveň jsou ve všech zkušebních plochách umístěna teplotní čidla (107-L - Campbell Scientific Ltd., Shepshed, UK) ve výšce 1,5 cm ode dna segmentu a dvě TDR sondy typu Campbell Scientific pro měření objemové vlhkosti v substrátu. TDR sondy jsou umístěny rovnoběžně vedle sebe ve vzdálenosti 30 cm od kraje segmentu z každé strany.

4.1.2. Substrát ACRE

Na zkušebních plochách S1 a S2 byl použit substrát pro extenzivní vegetační střechy od společnosti ACRE. Hloubka substrátu na zkušební ploše S1 má velikost 6 cm a na zkušební ploše S2 4 cm, rozdíl výšek substrátu je důsledkem rozdílného typu vegetace. Technický list od společnosti ACRE uvádí množství jednotlivých složek substrátu. Největší (55%) podíl má drcený spongilit (jemnozrnný křemičitovápenatý slínovec), dále obsahuje 20 % liadrainu (drcené keramické kamenivo), 20 % keramzitu (lehké keramické kamenivo) a 5 % rašeliny. Vlastnosti substrátu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2: Základní vlastnosti hodnocené podle Zákona č. 156/98 Sb. Zákon o hnojivech (Upraveno z: <http://www.acre.cz>)

Vlastnost	Hodnota
Vlhkost v %	max. 40
Spalitelné látky ve vysušeném vzorku v %	2–10
Hodnota pH (CaCl ₂)	6,5–8,5
Vodivost v mS.cm-1	max. 0,4
Obsah částic nad 20 mm v %	max. 5,0
Objemová hmotnost v suchém stavu [g/l]	450–850
Objemová hmotnost při MVK [g/l]	800–1300
MVK (% obj.)	30–45
Obsah vzduchu při MVK (% obj.)	15–30
Pórovitost (% obj.)	50–70
Vodopropustnost K _f mod	60–100
Organické látky [g/l]	≤ 40



Obrázek 3: Substrát ACRE (Převzato z: www.acre.cz)

4.1.3. Substrát BB Com

Substrát pro extenzivní zelené střechy FLORCOM SSE od společnosti BB Com byl použit na zkušebních plochách S3 a S4. Hloubka substrátu na zkušební ploše S3 má velikost 4 cm a na zkušební ploše S4 dosahuje výšky 6 cm. Výšky substrátů se v obou případech liší ze stejného důvodu jako u předchozích segmentů. Příbalový leták společnosti BB Com uvádí mezi složky substrátu liadrain, cihelnou drť, rašelinu a zelený kompost. Parametry substrátu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti substrátu od společnosti BB Com (Upraveno z: www.bbcom.cz)

Vlastnost	Hodnota
Vlhkost v %	max. 40
Spalitelné látky ve vysušeném vzorku v %	min. 3,0
Hodnota pH	7,0–8,0
Obsah částic nad 20 mm v %	max. 10,0
El. Vodivost v $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	max. 0,6
Objemová hmotnost v suchém stavu [g/l]	750
Objemová hmotnost při MVK [g/l]	1350
Pórovitost (% obj.)	min. 60



Obrázek 4: substrát BB Com v segmentu S4 (Zdroj: autorka)

4.1.4. Rozchodníkový koberec

Rozchodníkový koberec byl použit pro ozelenění zkušebních ploch S2 a S3, jedná se o předpěstovaný rozchodníkový koberec od společnosti SedumTop. Základem je kokosová rohož, kde je uložena PP síťka s vrstvou substrátu, do kterého je zapěstováno několik druhů rozchodníků. Po pokládce koberce na substrát by měla vegetace co nejdříve zakořenit a plnit svoji funkci. Pro experimentální plochy byl použit rozchodníkový koberec od značky SedumTop o tloušťce pohybující se v rozmezí 2,5 – 4 cm. Technický list koberce SedumTopMat/S5 uvádí pro standardní rozměr koberce 1,1 x 2 m následující vlastnosti. Hmotnost v suchém stavu se pohybuje v rozmezí 12 – 15 kg a ve stavu nasyceném vodou se rovná 15 – 18 kg. Míra pokrytí koberce vegetací je stanovena minimálně na 85 %. Vegetační složka obsahuje rostliny: *Sedum Album*, *Sedum Album Coral Carpet*, *Sedum Sexangulare*, *Sedum Hispanicum Minus*, *Sedum Lydium*, *Sedum Lydium Glauca*, *Sedum Acre*, *Sedum Reflexum*, *Sedum Reflexum Angelina*, *Sedum Spurium Fuldagut*, *Sedum Hybridum Immergrunchen*, *Sedum Kamtschaticum*.



Obrázek 6: Rozchodníkový koberec na segmentu S2
(Zdroj: autorka)



Obrázek 5: Rozchodníkový koberec na segmentu S3
(Zdroj: autorka)

4.1.5. Řízky rozchodníků

Řízky rozchodníků byly vytvořeny z výše uvedených rozchodníkových koberců a byly vysázeny do segmentů S1 a S4. Technický list společnosti SedumTop uvádí doporučené množství 100 – 150 kg vysázených řízků na 1 m² plochy. Aplikace je jednoduchá, stačí rozhoz řízků po ploše a v následujících 3 týdnech dodávat kontrolovanou zálivku. Jedná se o jednoduchý a levný způsob ozelenění vegetační střechy.



Obrázek 7: Rozchodníkové řízky na segmentu S1
(Zdroj: autorka)



Obrázek 8: Rozchodníkové řízky na segmentu S4
(Zdroj: autorka)

4.2. Lokalita a klimatické podmínky

Experiment se nachází na zelené střeše budovy UCEEB v Buštěhradu (souřadnice 50°9.41797'N, 14°10.19195'E) v nadmořské výšce 355 m n.m. V této lokalitě se nacházejí tři meteorologické stanice, které zaznamenávají množství srážek pomocí vyhřívaných srážkoměrů, teplotu vzduchu a půdy, rychlost a směr větru, atmosférický tlak a solární radiaci. Dvě z nich jsou pozemní meteostanice umístěné na oploceném místě v blízkosti budovy v nadmořských výškách 357 m n.m. a 355 m n.m. Třetí meteostanice je nainstalovaná na extenzivní zelené střeše budovy UCEEB v nadmořské výšce 365,3 m n.m. Klimatické podmínky jsou v této oblasti mírné s průměrnou roční teplotou 8°C a průměrným srážkovým úhrnem 500 mm/rok. (Sněhota et al.,2015; Jelínková et al., 2016).

Experimentální plochy jsou umístěny na extenzivní zelené střeše, která se nachází 10 m nad zemí a disponuje 2% sklonem a rozlohou 941 m².

Realizace testovacích segmentů byla dokončena v roce 2015, k výměně testovacího substrátu a vegetace došlo na podzim roku 2017.



Obrázek 9: Rozmístění segmentů S1 - S4 na zelené střeše (Zdroj: autorka)

4.3. Postupy měření

Naměřená data ze zelených ploch jsou zaznamenána pomocí dataloggerů typu CR1000 a CR3000 (Cambell Scientific, Logan, USA) v minutových intervalech a každých 15 minut zálohována na virtuálním serveru. Dataloggery jsou napájeny z místního elektrického rozvodu a disponují záložním bateriovým napájením pro případ výpadku elektrické energie (Sněhota et al.,2015).

Pro usnadnění vyhodnocení dat byly minutové záznamy sjednoceny na 15-ti minutové kroky. Naměřené srážky jsou udávány v mm, což odpovídá 1 l vody na 1 m² plochy. Plocha každého segmentu má velikost 1 m², proto naměřená data v mm není třeba upravovat pro získání množství vody v litrech.

4.4. Metody analýzy dat

Pro analýzu naměřených dat byla data zpracována a vykreslena v programu Matlab. Hodnoty srážkových a odtokových úhrnů a teplot nad zelenou střechou a betonovou dlažbou byly použity ze zaznamenaných dat z dataloggeru CR3000. Pro hodnoty vlhkostí z TDR čidel, hmotnosti segmentu S2 a teplot v substrátech byla použita zaznamenaná data z dataloggeru CR1000. Pro výpočet zásoby vody v půdě byly naměřené hodnoty vlhkostí převedeny na zásobu vody v půdě o hloubce 0,1 m. Pro zásobu vody z hmotnosti byla od naměřené hmotnosti odečtena nejnižší hodnota z daného období (viz. kap 5.5). Pro výpočet součinitelů odtoku byly vybrány srážkové epizody, u kterých došlo k odtoku vody ze segmentů (viz. kap. 5.6).

4.5. Kalibrace průtokoměrů

Průtokoměry a svodné žlaby se časem mohou zanášet nečistotami, případně může dojít k jejich uvolnění, nebo geometrickým deformacím, proto by mělo docházet k pravidelným kontrolám a kalibracím, aby naměřené hodnoty odtoku odpovídaly skutečnému množství odtékající vody. Pro záznam odtoků se měří počet překlopení člunku průtokoměru o určitém objemu. Pokud je člunek zanesený nechtěným materiálem, může dojít k dřívějšímu překlopení, aniž by byla naplněna kapacita člunku. Zanesený svodný žlab může též ovlivnit průtok a ucpat hadičku vedoucí k průtokoměru, v tomto případě by mohlo docházet k odtoku vody mimo průtokoměr a chybnému měření množství protékající vody.

Dne 2.5.2019 byla provedena na zkušebních plochách S1 až S4 kalibrace průtokoměrů včetně vyčištění svodných žlabů. Kalibrace byla provedena pomocí dvou metod. První metoda byla provedena nalitím přesného objemu z odměrného válce v určitém čase. Ze záznamů z dataloggeru CR1000 na zelené střeše byla získána data odtoků v určitých časových intervalech, ze kterých bylo možné za pomoci naměřené hodnoty a původní hodnoty objemu průtokoměru vypočítat počet překlopení člunku. Z hodnot přesného objemu vody z válce a počtu překlopení bylo možné spočítat skutečný objem překlápěcího člunku. Druhá metoda byla provedena pomocí průtokoměru s USB dataloggerem, který zaznamenával množství vody proteklé do svodného žlabu segmentu. Ze záznamů z USB dataloggeru bylo možné spočítat

přesné množství proteklé vody. Díky záznamům odtoků z dataloggeru CR1000 bylo možné spočítat počet klapnutí v určitém časovém intervalu a určit přesný objem překlápěcího člunku průtokoměru.

Výsledkem kalibrace bylo zjištění, že překlápěcí člunky mají větší objem, než který zaznamenává datalogger CR1000. Naměřené hodnoty byly navýšeny o vypočtené koeficienty 1,26 (segment S1), 1,41 (segment S2), 2,04 (segment S3) a o 1,94 (segment S4). V následující tabulce jsou uvedeny objemy klapátek ze záznamů dataloggeru, vypočtené objemy klapátek po kalibraci a kalibrační koeficienty.

Tabulka 4: Výsledky kalibračních koeficientů včetně objemů klapátek

	objem klapátek z dataloggeru [ml]	nový objem klapátek [ml]	kalibrační koeficienty [-]
S1	62,5	78,9	1,26
S2	64,5	91,0	1,41
S3	50	101,9	2,04
S4	50	97,2	1,94

5. Výsledky a diskuze

Pro vyhodnocení měření byla použita data z období od 24. 10. 2018 do 27. 3. 2019. Přibližně tři týdny před sledovaným obdobím nedošlo k srážkové události a segmenty s experimentálními plochami nebyly nasycené vodou.

5.1. Srážkové epizody ve zkoumaném období

Ve vyhodnocovaném období je celkové množství srážky rovno 107,4 mm. Nejmenší měsíční úhrn srážek byl zaznamenán v listopadu (2,1 mm srážek). Naopak největší množství srážek bylo zaznamenáno v prosinci (31,7 mm). V následující tabulce jsou popsány celkové měsíční úhrny srážek a nejvyšší denní srážkové úhrny.

Tabulka 5: Měsíční srážkové úhrny a maximální denní srážkové úhrny ve sledovaném období

	měsíční úhrn srážek [mm]	max. denní úhrn srážek [mm]
<i>říjen</i>	19,3	0,9
<i>listopad</i>	2,1	0,1
<i>prosinec</i>	31,7	1,2
<i>leden</i>	10,1	0,6
<i>únor</i>	22,4	1,0
<i>březen</i>	21,8	1,4
<i>Celé období</i>	107,4	1,4

5.2. Odtokové vlastnosti zelených ploch

Pro sledované období se pomocí naměřených dat dalo zhodnotit množství odtoku vody ze segmentů. Z grafu 1 a tabulky 6 je patrné, že segment S3 zaznamenával podstatně nižší odtok než ostatní segmenty. Při provádění kalibrace průtokoměrů na tomto segmentu nebyla zjištěna závada průtokoměru, nebo porušení svodného žlabu. Při porovnání nízkých odtoků s naměřenou vlhkostí v segmentu S3 (viz. kap. 5.4) je patrné, že na začátku sledovaného období byly v segmentu naměřeny nízké hodnoty vlhkosti. Je pravděpodobné, že méně nasycená půda byla schopná zadržet vodu z následujících srážkových událostí bez výrazného odtoku.

Největší celkový odtok za celé sledované období byl zaznamenán na segmentu S4 o velikosti 80,2 mm. U segmentu S2 došlo k odtoku o velikosti 74,7 mm a u segmentu S1 byl naměřen celkový odtok 73,2 mm. Nejmenší celkový odtok byl naměřen na segmentu S3 o velikosti 22,4 mm. Nejvyšší měsíční odtok o úhrnu 41,1 mm byl zaznamenán v prosinci na segmentu S4.

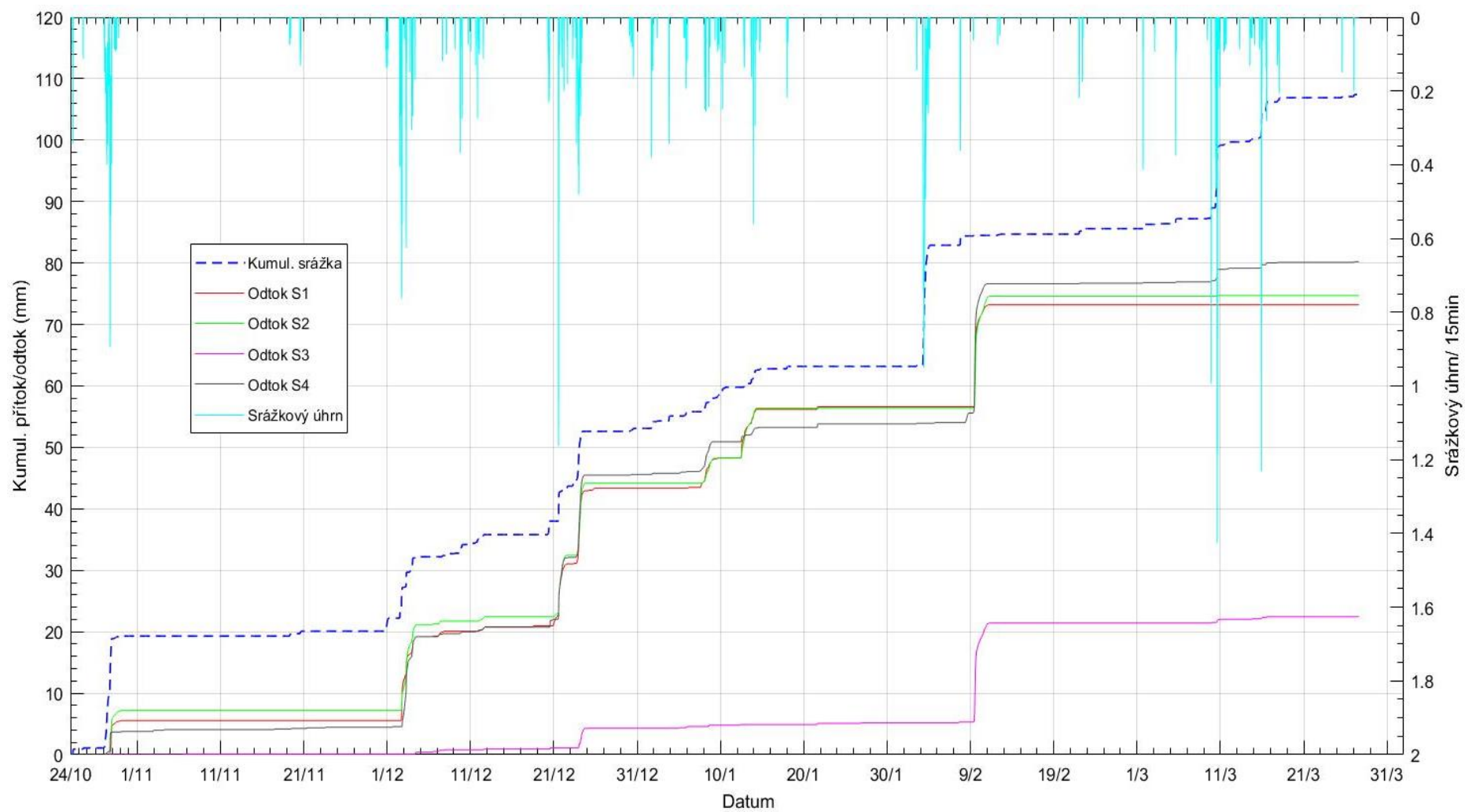
Všechny průběhy odtoků a srážkových úhrnů jsou popsány v tabulce 6 a znázorněny v grafu 1.

Tabulka 6: Měsíční odtok ze segmentů

	měsíční odtok [mm]				srážkový úhrn [mm]
	S1	S2	S3	S4	
<i>říjen</i>	5,6	7,2	0,0	3,8	19,3
<i>listopad</i>	0,0	0,0	0,1	0,7	2,1
<i>prosinec</i>	37,8	36,9	4,2	41,1	31,7
<i>leden</i>	13,3	12,2	0,9	8,2	10,1
<i>únor</i>	16,6	18,2	16,2	22,9	22,4
<i>březen</i>	0,0	0,1	1,0	3,5	21,8
<i>Celé období</i>	73,2	74,7	22,4	80,2	107,4

Podle tabulky 6 je odtok v lednu vyšší než srážkový úhrn, tento jev je způsoben srážkovou epizodou na konci prosince, kdy její odtok přesahuje do měsíce ledna. Během zimních měsíců došlo k vyšším odtokům z důvodu většího nasycení půdy vodou a snížení její retenční schopnosti. V období od 27. 2. 2019 do 27. 3. 2019 došlo k výrazně nízkým odtokům ze segmentů. Důvodem bylo menší nasycení půdy vodou (průběh vlhkostí viz. kap. 5.4) a významný výpar z důsledku naměřených vyšších teplot.

Z grafu 1 je patrné, že během období od 2. 1. 2019 do 8. 1. 2019, kdy se teploty pohybovaly pod bodem mrazu, nedocházelo k žádnému odtoku až do chvíle tání sněhu způsobeného vyššími teplotami. Mezi další časové úseky, kdy došlo k mrznutí a následnému tání sněhu, patří období od 10. 1. 2019 do 12. 1. 2019 nebo od 3. 2. 2019 do 9. 2. 2019.



Graf 1: Závislost odtokových vlastností segmentů na srážkovém úhrnu ve sledovaném období

5.3. Teplotní režim

Pro měření teploty vzduchu je na zelené střeše budovy umístěno teplotní čidlo ve výšce 2 m a ve výšce 5 cm nad střechou. Ve všech segmentech jsou v hloubce 1,5 cm nade dnem segmentu uložena teplotní čidla pro měření teploty přímo v substrátech segmentů. Pro porovnání hodnot ze segmentů je na střeše budovy umístěno teplotní čidlo nad a od betonovou dlažbou. V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné měsíční teploty vzduchu a substrátů, maximální a minimální měsíční teploty vzduchu a substrátů.

Tabulka 7: Průměrná měsíční teplota, maximální a minimální teplota vzduchu na zelené střeše ve výšce 5 cm a nad betonovou dlažbou ve sledovaném období

Teplota vzduchu na zelené střeše a nad betonovou dlažbou						
	prům. teplota [°C]		max. teplota [°C]		min. teplota [°C]	
	zelená střecha	dlažba	zelená střecha	dlažba	zelená střecha	Dlažba
<i>říjen</i>	8,3	8,1	19,2	23,2	1,3	-0,4
<i>listopad</i>	4,2	3,5	16,3	18,8	-7,5	-13,2
<i>prosinec</i>	2,5	1,6	12,0	12,9	-4,6	-7,4
<i>leden</i>	-0,6	-1,5	7,7	7,9	-12,0	-15,2
<i>únor</i>	3,1	3,1	19,7	25,3	-7,0	-12,0
<i>březen</i>	6,7	8,1	22,0	37,5	0,1	-1,3
<i>Celé období</i>	4,0	3,8	22,0	37,5	-12,0	-15,2

Tabulka 7 popisuje průměrné měsíční teploty vzduchu ve výšce 5 cm nad zelenou střechou s extrémními hodnotami teplot a porovnává je s teplotami naměřenými nad betonovou dlažbou. Mezi nejteplejší měsíce sledovaného období řadíme říjen a březen, mezi nejchladnější patří leden. Nejvyšší naměřená teplota vzduchu nad zelenou střechou ve zkoumaném období je rovna 22,0 °C, naopak nejnižší teplota vzduchu byla naměřena při -12,0°C. Teploty nad betonovou dlažbou se výrazně liší, maximální hodnota dosahuje až 37,5 °C a nejnižší naměřená hodnota ve sledovaném období je rovna -15,2 °C. Výsledky poukazují na to, že zelená střecha má schopnost snižovat teplotu vzduchu během teplejších měsíců a během chladnějších teplotu zvyšovat.

Tabulka 8: Průměrná teplota v substrátech segmentů

Teplota v substrátech				
průměrná teplota [°C]				
	S1	S2	S3	S4
<i>říjen</i>	7,1	7,0	7,1	7,3
<i>listopad</i>	3,5	3,7	3,9	3,8
<i>prosinec</i>	1,5	1,6	1,6	1,7
<i>leden</i>	-1,1	-1,0	-0,8	-0,9
<i>únor</i>	1,9	1,8	1,9	2,3
<i>březen</i>	5,9	5,9	5,8	6,0
<i>Celé období</i>	3,1	3,2	3,2	3,4

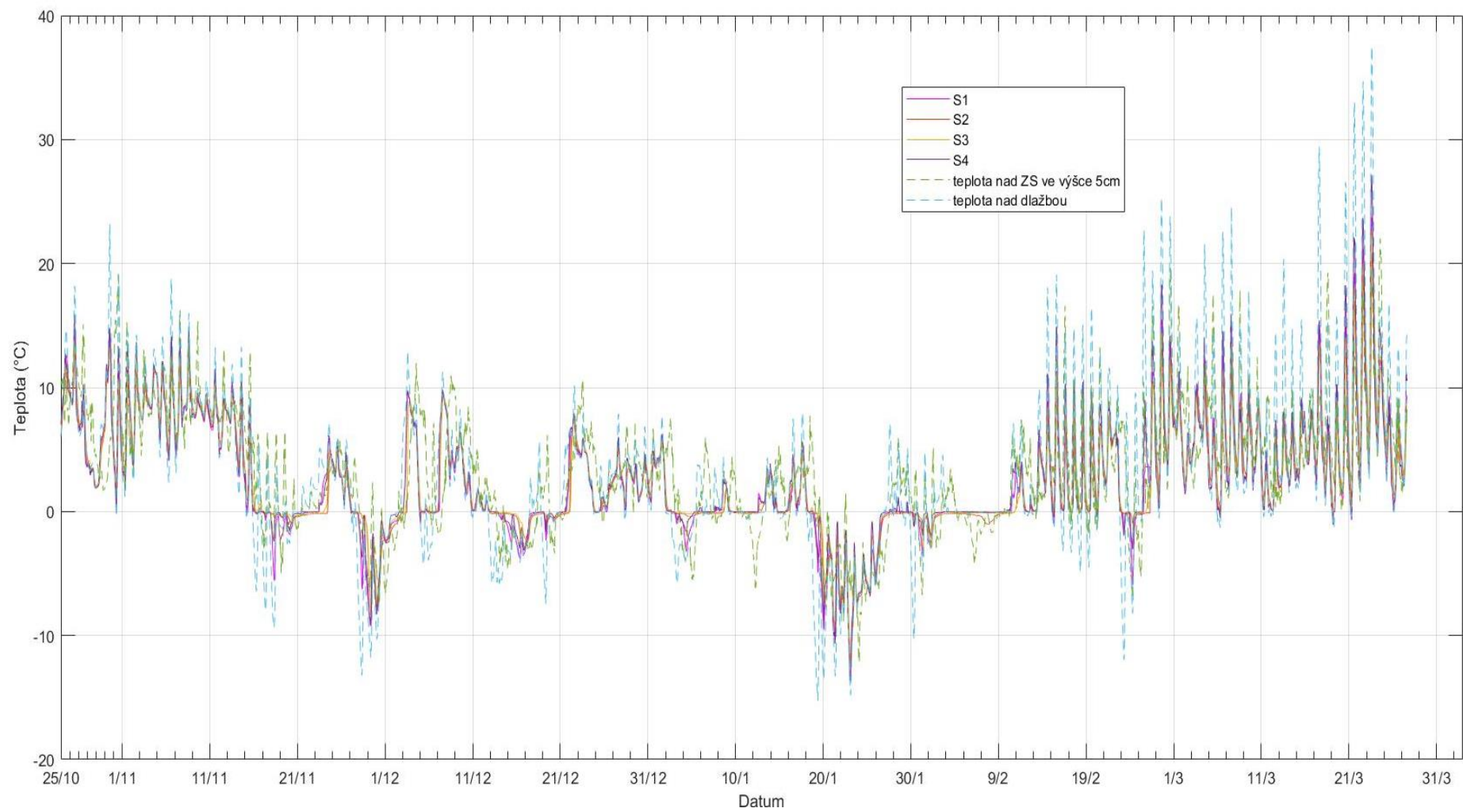
V tabulce 8 jsou shrnuty průměrné hodnoty teplot substrátů v segmentech. Teploty v substrátech celkově vykazují nižší hodnotu než zaznamenané teploty na zelené střeše a v teplejších měsících mají i nižší teplotu než hodnoty nad betonovou dlažbou. Z hlediska průměrných hodnot vyšel nejchladnější segment S1 a nejteplejší S4.

Tabulka 9: Maximální a minimální teplota v substrátech segmentů

Teplota v substrátech								
	max. teplota [°C]				min. teplota [°C]			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<i>říjen</i>	14,4	13,4	13,3	15,9	0,3	1,5	1,3	0,1
<i>listopad</i>	13,5	12,6	13,1	14,8	-9,2	-8,4	-8,0	-9,2
<i>prosinec</i>	9,7	9,4	9,5	9,8	-3,8	-3,0	-2,3	-3,1
<i>leden</i>	5,8	5,7	5,7	6,2	-12,6	-12,5	-12,4	-13,7
<i>únor</i>	15,4	13,7	14,3	18,3	-5,9	-2,2	-2,7	-3,0
<i>březen</i>	23,7	20,9	22,6	27,2	-0,7	0,0	-0,1	-1,1
<i>Celé období</i>	23,7	20,9	22,6	27,2	-12,6	-12,5	-12,4	-13,7

Tabulka 9 znázorňuje extrémní teploty v substrátech segmentů. Maximální měsíční teploty vychází nižší než nad betonovou dlažbou a ve většině měsíců vychází nižší i než teploty na zelené střeše. Z hlediska minimálních měsíčních teplot vychází teploty v substrátech vždy vyšší než teploty nad betonovou dlažbou. Zelené střechy mají termoregulační schopnost, v průběhu chladnějších a teplejších měsíců dochází k menším výkyvům teplot.

Graf 2 zobrazuje porovnání naměřených hodnot všech zkoumaných ploch ve sledovaném období.



Graf 2: Teploty vzduchu nad zelenou střechou ve výšce 5 cm, teploty nad betonovou dlažbou a teploty substrátů v segmentech

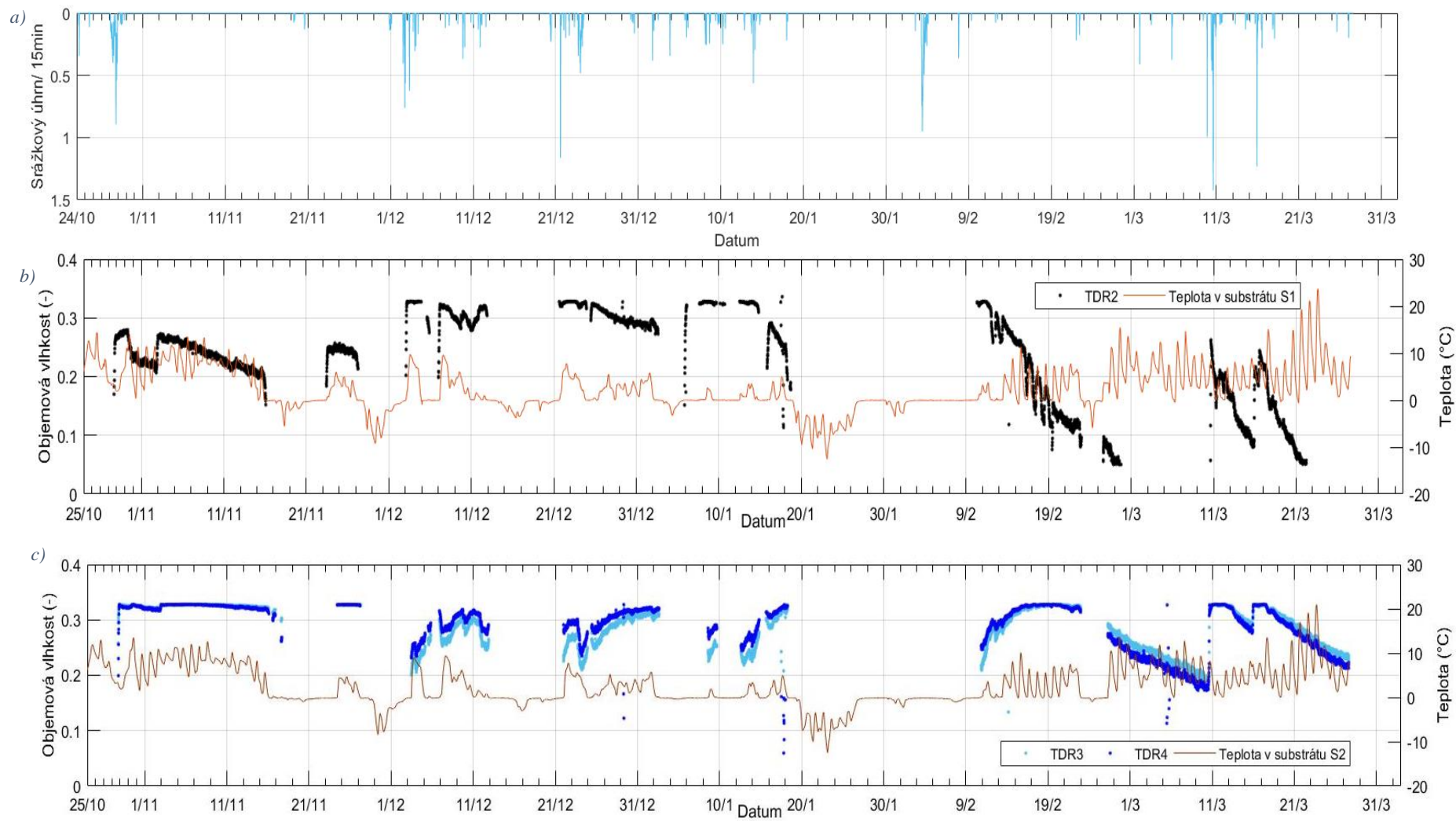
5.4. Vlhkost substrátu

Objemová vlhkost půdy byla na segmentech naměřena pomocí TDR čidel, umístěných rovnoběžně vedle sebe. V každém segmentu se nachází dvě měřící sondy. Z hlediska nepravděpodobných hodnot, naměřených ze sondy TDR1 ze segmentu S1 bylo toto čidlo z výsledků vyloučeno.

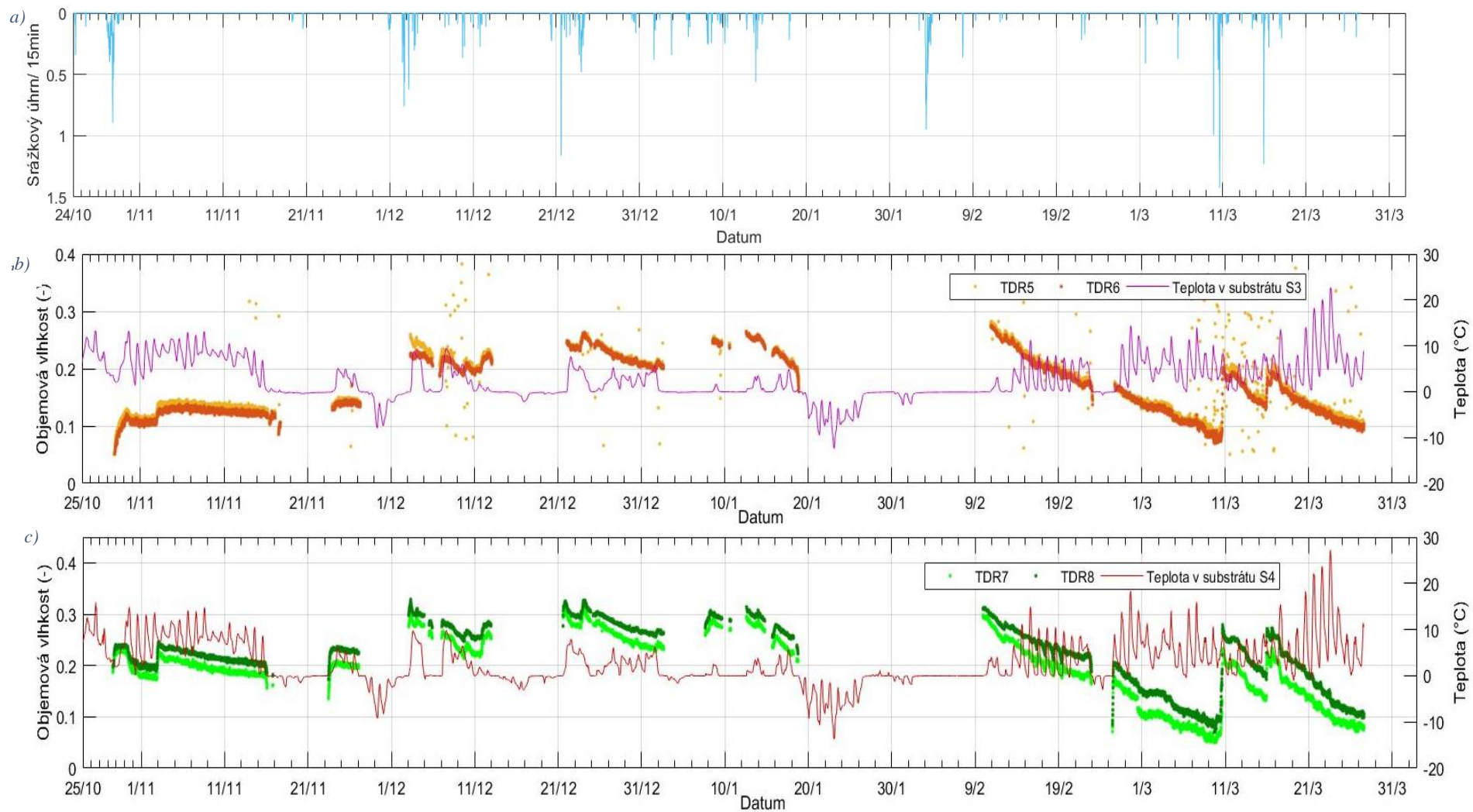
Při analýze hodnot pro vlhkost půdy bylo zjištěno, že pokud teplota v substrátu poklesla pod 0 °C, začaly TDR sondy zaznamenávat chybné hodnoty (tyto chybné hodnoty jsou v následném vyhodnocení odstraněny). Vztahy mezi vlhkostmi segmentů a teplotami v substrátech znázorňují grafy 3 a 4 v závislosti na srážkovém úhrnu. Graf 5 znázorňuje vzájemné porovnání vlhkostí všech segmentů v závislosti na srážkovém úhrnu ve sledovaném období.

Z grafů 3 až 5 je patrné, že při srážkové události se objemová vlhkost výrazně zvýší a následně díky odtoku a případné evapotranspiraci pozvolna klesá. Podobný průběh změn vlhkostí dochází v segmentech S1, S3 a S4. Nejnižší hodnoty vlhkostí byly zaznamenány v segmentu S3. Nejvyšší hodnoty vlhkostí vykazuje segment S2, průběh vlhkostí se liší od ostatních segmentů. Po většině časových úsecích, kdy se teplota substrátu pohybovala pod bodem 0 °C, byla zaznamenaná vlhkost výrazně nižší a následně stoupala do odpovídajících hodnot. Tento průběh může být způsoben vyšší citlivostí měřícího zařízení na okolní teplotě. Podle vykreslení průběhu hodnot je patrné, že segment S2 má vyšší retenční schopnost než ostatní segmenty.

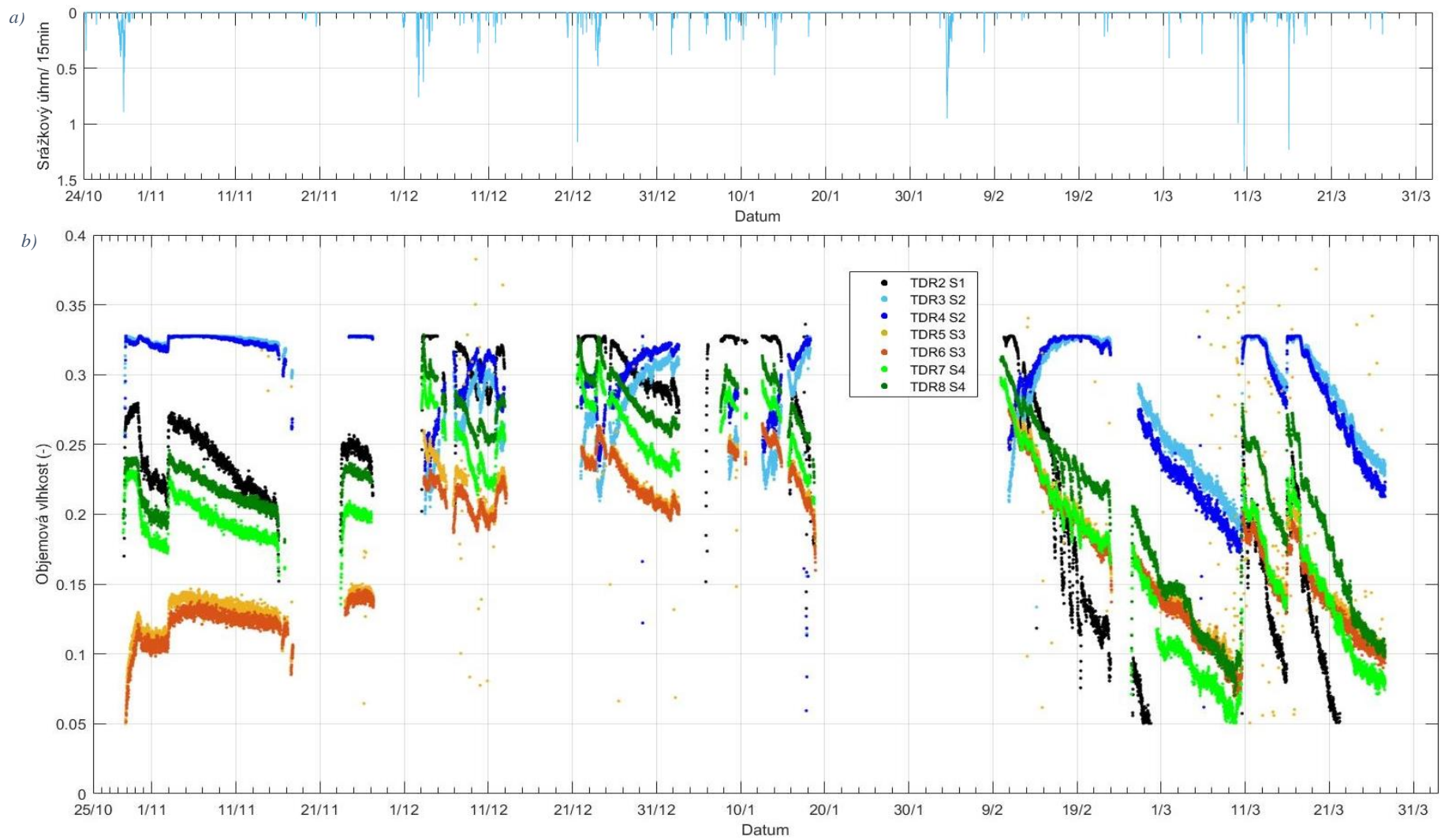
U segmentů s rozchodníkovým kobercem dochází k pozvolnějším poklesům vlhkostí kvůli lepší schopnosti zadržovat vodu z důvodu rozsáhlejšího množství vegetace.



Graf 3: Průběh objemové vlhkosti segmentu S1 a S2 včetně teplot v substrátech (b,c) a průběh srážkového úhrnu (a)



Graf 4: Průběh objemové vlhkosti segmentu S3 a S4 včetně teplot v substrátech (b,c) a průběh srážkového úhrnu (a)

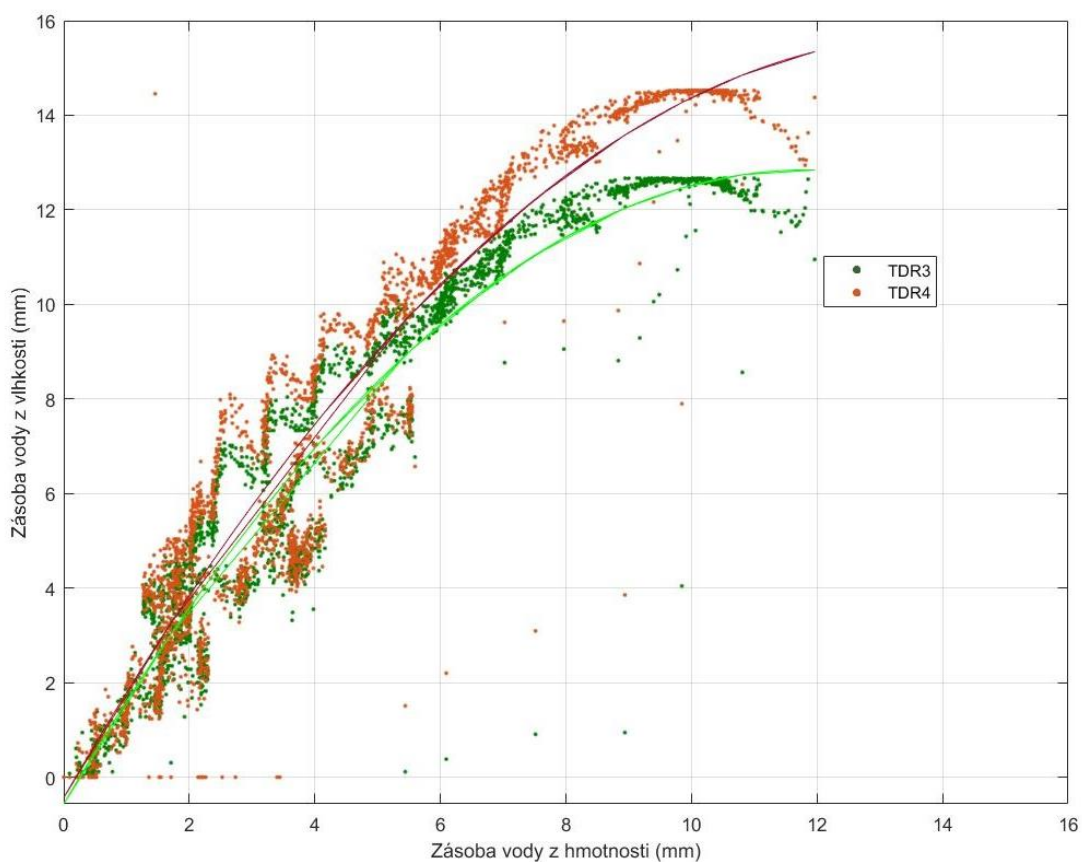


Graf 5: Porovnání objemových vlhkostí segmentů S1-S4 (b) a závislost na srážkovém úhrnu (a)

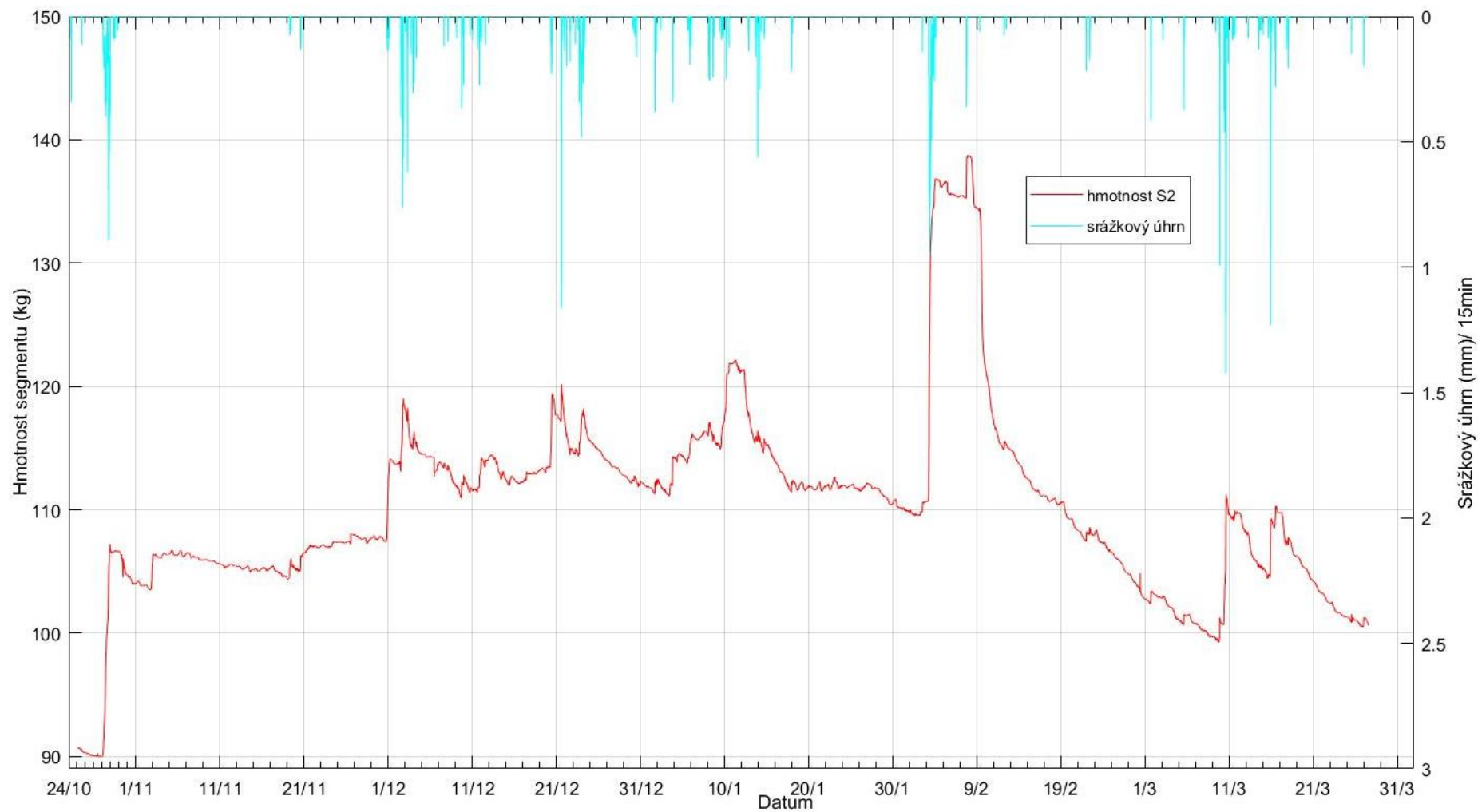
5.5. Hmotnost a zásoba vody v segmentu

Váží čidla umístěná v segmentu S2 zaznamenávají celkovou váhu segmentu. V grafu 7 je znázorněn průběh váhy segmentu S2 v závislosti na srážkových úhrnech. Vysoké hodnoty hmotnosti v zimních měsících jsou způsobeny tíhou sněhu na ploše segmentu. Z grafu je patrné, že při srážkových událostech se hmotnost zvyšuje a následně kvůli odtoku a výparu klesá.

Pro vykreslení vzájemného vztahu mezi zásobou vody z objemové vlhkosti a zásobou vody z hmotnosti byly použity hodnoty naměřené pro segment S2 od 27. 2. 2019 dokonce sledovaného období. Toto časové období je zvoleno z důvodu, aby nedocházelo ke zkreslení vztahu kvůli hodnotám naměřeným během zimních měsíců, kdy váží čidla zaznamenávají i tíhu sněhové pokrývky. Vzájemná závislost veličin je zobrazena v grafu 6. Pro vykreslení závislosti byla jako výchozí bod 0 uvažována naměřená hmotnost s nejnižší zásobou vody ve sledovaném úseku.



Graf 6: Korelace zásoby vody z naměřené vlhkosti a hmotnosti v období 27. 2. 2019 – 27. 3. 2019



Graf 7: Závislost hmotnosti segmentu S2 na srážkových úhrnech

5.6. Určení odtokového součinitele

Pro určení odtokového součinitele byly vybrány srážkové epizody, u kterých došlo k odtoku ze segmentů, počínaje začátkem srážky a konče posledním zaznamenaným odtokem. V tabulce 10 a 11 jsou uvedeny hodnoty celkové srážky a celkového odtoku vody ze segmentu v době srážkové epizody a z poměru těchto hodnot spočítaný součinitel odtoku. Dále je zaznamenána průměrná teplota vzduchu.

Tabulka 10: Charakteristiky srážkových událostí a výpočet součinitelů odtoku pro jednotlivé epizody v zimním režimu

datum epizod	teplota vzd. [°C]	úhrn srážky [mm]	celkový úhrn odtoku [mm]				odtokový součinitel C_s [-]			
			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
30.11.-4.12.	2,9	12,1	13,7	13,9	0,3	14,7	1,13	1,15	0,03	1,22
20.12.-25.12.	4,3	16,8	22,4	21,7	3,4	24,7	1,33	1,29	0,20	1,47
30.12.-14.1.	1,5	10,2	12,9	12,2	0,6	7,8	1,26	1,20	0,06	0,76
1.2.-11.2	1,0	21,3	16,6	18,2	16,2	22,8	0,78	0,86	0,76	1,07
Průměrná hodnota							1,13	1,12	0,26	1,13

Tabulka 11: Charakteristiky srážkových událostí a výpočet součinitelů odtoku pro jednotlivé epizody v období s vyššími teplotami

datum epizod	teplota vzd. [°C]	úhrn srážky [mm]	celkový úhrn odtoku [mm]				odtokový součinitel C_s [-]			
			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
28.10.-30.10.	7,1	18,2	5,6	7,2	0,0	4,1	0,31	0,40	0,00	0,22
7.12.-12.12.	4,8	3,6	1,5	1,2	0,4	1,6	0,42	0,33	0,11	0,43
9.3.-18.3.	6,1	19,7	0,0	0,1	1,0	3,2	0,00	0,00	0,05	0,16
Průměrná hodnota							0,24	0,24	0,06	0,27

Z tabulek 10 a 11 můžeme porovnat hodnoty součinitele odtoku ze zimního období a období s vyššími teplotami. Pro délku epizod v zimním období, kdy došlo k sněhovým srážkám byly brány epizody od počátku srážky po dobu, kdy došlo k roztání sněhu a celkovému odtoku. V zimním období docházelo k vyšším odtokům z důvodu nasycení půdy vodou a vypočtené součinitele odtoku se pohybují v rozmezí 0,78-1,33 (segment S1), 0,86-1,29 (segment S2), 0,06-0,20 (segment S3) a 0,76-1,47 (segment S4). U srážkových epizod z tabulky 10, u kterých vyšel odtokový součinitel větší než 1, jsou vysoké hodnoty odtoku způsobeny mnoha faktory. Vzhledem k tomu, že se jedná o srážkové epizody během zimního období, kdy došlo ke sněhovým srážkám, je možné, že vysoké hodnoty odtoku byly způsobeny navátím sněhu na zkušební plochy nebo zamrznutím vody v překlápěcích průtokoměrech, což mohlo způsobit zmenšení kapacity člunku a jeho předčasné překlopení. Několik dní před srážkovou epizodou od 20. 12. 2018 do 25. 12. 2018 (kde vyšly nejvyšší odtokové součinitele), byly naměřeny teploty pod bodem mrazu. Vysoké hodnoty odtoku mohlo také ovlivnit roztání zamrzlé vody z předchozí srážky.

V období s naměřenými vyššími teplotami došlo k podstatně nižším odtokům, z důvodu méně nasycené půdy a výparu z půdy. Z těchto epizod se součinitele odtoku pohybují v rozmezí 0,00-0,42 (segment S1), 0,00-0,40 (segment S2), 0,00-0,11 (segment S3) a 0,16-0,43 (segment S4). Nejnižší hodnoty součinitele odtoku byly spočítány u srážkové epizody od 9. 3. 2019 do 18. 3. 2019, kdy došlo k výrazné retenci vody z důvodu málo nasycené půdy vodou (průběh vlhkostí viz. kap 5.4.). Zároveň došlo k výparu vody z půdy z důvodu naměřených vysokých teplot (viz. kap. 5.3).

Průměrné hodnoty odtokových součinitelů vychází podobné u segmentů S1, S2 a S4. Výrazně nižší hodnoty byly zaznamenány na segmentu S3.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zanalyzovat a porovnat srážkoodtokové vlastnosti zelených střech na čtyřech experimentálních plochách, lišících se typem substrátu a vegetace. Pro analýzu byla použita data ve sledovaném období od 24. 10. 2018 do 27. 3. 2019. Pro vyhodnocení dat byla použita naměřená data srážkových úhrnů, odtoků vody ze segmentů, teplotního a vlhkostního režimu a hmotnosti segmentu (v případě S2).

Z hlediska rozboru srážkoodtokových vlastností bylo zjištěno, že ze segmentu S4 (substrát BB Com, rozchodníkové řízky) odtéká nejvíce vody. Nepatrně menší odtok zaznamenal segment S2 (substrát Acre, rozchodníkový koberec). Největší retenční schopnost zaznamenal segment S3 (substrát BB Com, rozchodníkový koberec) a S1 (substrát Acre, rozchodníkové řízky).

Při provádění kalibrace byla na základě nízkých naměřených hodnot odtoku provedena kontrola průtokoměru na segmentu S3. Nebyla zjištěna žádná technická závada průtokoměru nebo svodného žlabu. Nízké hodnoty odtoku mohly být způsobeny nízkou vlhkostí v substrátu. Na segmentu byl použit rozchodníkový koberec, který má oproti samotným rozchodníkovým řízkům vyšší retenční schopnost.

Z vykreslení průběhů vlhkostí je zřejmé, že v zimním období byla půda nasycená vodou a její retenční schopnost se významně snížila. Od 16. 2. 2019 do konce sledovaného období, kdy byly naměřeny vyšší teploty, došlo k výparu vody z půdy a snížení vlhkosti v půdě a důsledkem toho se zvýšila její retenční schopnost.

Při sledování průběhu vlhkostí je zřejmé, že nejvyšší hodnoty vlhkostí zaznamenává segment S2, naopak nejnižší hodnoty jsou naměřeny na segmentu S3. Z tohoto hlediska vyplývá, že v segmentu S2 byla půda nejvíce nasycená. Po srážkové události vlhkost v segmentech osázených rozchodníkovými řízkami klesá rychleji než v segmentech s rozchodníkovými koberci. Z toho je patrné, že rozchodníkové koberce mají lepší schopnost zadržovat vodu. K většímu výparu dochází u ploch s řízkami rozchodníků i přes menší množství rostoucí vegetace.

Naměřené teploty v substrátech ukazují, že nejvyšší průměrná teplota byla zaznamenána v segmentu S4 a nejnižší v segmentu S1. Jedním z důvodů vyšší

teploty v segmentu S4 je tmavší barva substrátu na povrchu. Z porovnání naměřených teplot ovzduší nad zelenou střechou a nad betonovou dlažbou vyplývá, že zelená střecha má schopnost v teplejších měsících teplotu vzduchu snižovat a v chladnějších měsících naopak teplotu ovzduší zvyšovat.

Pro další výzkumné činnosti těchto experimentálních ploch, zaměřujících se na zimní režim, navrhuji, aby byla na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov umístěna kamera pro přesnější určení sněhových srážek. Vyhodnocení srážkoodtokových vlastností dokazuje výhody zelených střech v redukci odtoku dešťové vody a zlepšení mikroklima.

7. Literatura

7.1. Odborná literatura

- Allen R. G., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [online]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations [cit. 2019-04-29]. ISBN 92-510-4219-5.
- Briaud J. L., 2013. Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils [online]. Hoboken, New Jersey: John Wiley [cit. 2019-04-14]. ISBN 978-0-470-94856-9.
- Burian S. a kol., 2016. Standardy pro navrhování zelených střech [online] [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://archiv.novazelenausporam.cz/file/786/zelene-strechy_standardy.pdf
- Berndtsson C. J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* [online]. 36(4), 351-360 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014. ISSN 09258574. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857410000029>
- FLL, 2018. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs [online] [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2019/01/FLL_greenroofguidelines_2018.pdf
- Getter K. L., D. B. Rowe a J.A. Andresen, 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* [online]. 31(4), 225-231 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.06.004. ISSN 09258574. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857407001309>
- Hanzlíková J., 2018. Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- Hillel D., 1998. Environmental soil physics. San Diego, CA: Academic Press. ISBN 01-234-8525-8.
- Jelínková V., Dohnal M. a Píček T., 2015. A green roof segment for monitoring the hydrological and thermal behaviour of anthropogenic soil systems. *Soil and Water Research*. 10(No. 4), 262-270. DOI: 10.17221/17/2015-SWR. ISSN 18015395.
- Jelinkova V., Dohnal M. a Sacha J., 2016. Thermal and water regime studied in a thin soil layer of green roof systems at early stage of pedogenesis. *Journal of Soils and Sediments* [online]. 16(11), 2568-2579 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1007/s11368-016-1457-7. ISSN 1439-0108. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11368-016-1457-7>
- Kutílek M., 1978. Vodohospodářská pedologie. 2. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p.
- Kutílek M., 1966. Vodohospodářská pedologie: celostátní učebnice pro vysoké školy. Praha: SNTL. Učební texty vysokých škol.
- Kutílek M., Kuráž V. a Císlarová M., 2000. *Hydropedologie* 10. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-010-2237-4.
- King K. W., Arnold J. G a Bingner R. L., 1999. Comparison of Green-Ampt and curve number methods on goodwin creek watershed using swat. *Transactions of the*

- ASAE [online]. 42(4), 919-926 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.13031/2013.13272. ISSN 2151-0059.
- Lastoria B., 2008: Hydrological processes on the land surface: A survey of modelling approaches. FORALPS Technical Report, 9. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 56 pp.
- Mentens J., Raes D. a Hermy M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning* [online]. 77(3), 217-226 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.02.010. ISSN 01692046. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204605000496>
- Nagase A. a Dunnett N., 2011. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning* [online]. 104(3-4), 356-363 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.11.001. ISSN 01692046. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204611003239>
- Nawaz R., McDonald A. a Postoyko S., 2015. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering* [online]. 82, 66-80 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.11.061. ISSN 09258574. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857414006570>
- Simmons M. T., Gardiner B., Windhager S. a Tinsley J., 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* [online]. 11(4), 339-348 [cit. 2019-03-28]. DOI: 10.1007/s11252-008-0069-4. ISSN 1083-8155. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11252-008-0069-4>
- Sněhota, M., Jelínková V., Šácha J., Bareš V. a Vogel T., 2015. Meteorologická měření v okolí budovy UCEED.
- Šimečková J. a Večeřová I., ed., 2010. Zelené střechy - naděje pro budoucnost [online]. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně [cit. 2019-04-18]. ISBN 978-80-254-9123-2.
- Šimečková J. a Večeřová I., Zelené střechy - naděje pro budoucnost II. [online]. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně., 2016 [cit. 2019-04-03].
- van Genuchten M. Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils I. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 44(5) [cit. 2019-05-24]. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x. ISSN 0361-5995. Dostupné z: <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/44/5/SS0440050892>
- Vanwoert N.D., Rowe D. B., Andresen J. A., Rugh C. L., Fernandez R. T. a Xiao L., 2005. Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environment Quality* [online]. 34(3) [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.2134/jeq2004.0364. ISSN 1537-2537. Dostupné z: <https://www.agronomy.org/publications/jeq/abstracts/34/3/1036>
- Standardy pro navrhování zelených střech [online], 2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://archiv.novazelenausporam.cz/file/786/zelene-strechy_standardy.pdf

7.2. Internetové zdroje

- Acre: Střešní substrát [online]. [cit. 2019-04-24].
Dostupné z: <http://www.acre.cz/cs/menu/produkty/material-pro-zelene-strechy/stresni-substrat/>
- BBCom: Sortiment [online]. [cit. 2019-04-25].
Dostupné z: <https://www.bbcom.cz/sortiment/vegetacni-strechy/stresni-extenzivni-substrat/pro-stresni-zahrady-extenzivni-sse>
- Ekrost: Substráty [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.ekrost.cz>
- SedumTop: Technický list [online]. [cit. 2019-04-25].
Dostupné z: http://sedumtop.cz/wp-content/uploads/2018/09/technickylist_sedumntopmatS5_2018_08.pdf
- Meter group: Soil water potential sensor, 2017 [online], [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/teros-21/>

8. Seznam obrázků a grafů

8.1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Porovnání vlhkosti mezi aktuální infiltrací a Green Amptovou metodou (Převzato z: Lastoria, 2008)	- 12 -
Obrázek 2: Orientační uspořádání vrstev vegetační střechy (Upraveno z: http://www.ekrost.cz/).....	- 19 -
Obrázek 3: Substrát ACRE (Převzato z: www.acre.cz)	- 25 -
Obrázek 4: substrát BB Com v segmentu S4 (Zdroj: autorka).....	- 26 -
Obrázek 5: Rozchodníkový koberec na segmentu S3 (Zdroj: autorka)	- 27 -
Obrázek 6: Rozchodníkový koberec na segmentu S2 (Zdroj: autorka)	- 27 -
Obrázek 7: Rozchodníkové řízky na segmentu S1 (Zdroj: autorka).....	- 28 -
Obrázek 8: Rozchodníkové řízky na segmentu S4 (Zdroj: autorka).....	- 28 -
Obrázek 9: Rozmístění segmentů S1 - S4 na zelené střechě (Zdroj: autorka) ..	- 29 -

8.2. Seznam grafů

Graf 1: Závislost odtokových vlastností segmentů na srážkovém úhrnu ve sledovaném období.....	- 35 -
Graf 2: Teploty vzduchu nad zelenou střechou ve výšce 5 cm, teploty nad betonovou dlažbou a teploty substrátů v segmentech	- 39 -
Graf 3: Průběh objemové vlhkosti segmentu S1 a S2 včetně teplot v substrátech (b,c) a průběh srážkového úhrnu (a)	- 41 -
Graf 4: Průběh objemové vlhkosti segmentu S3 a S4 včetně teplot v substrátech (b,c) a průběh srážkového úhrnu (a)	- 42 -
Graf 5: Porovnání objemových vlhkostí segmentů S1-S4 (b) a závislost na srážkovém úhrnu (a).....	- 43 -
Graf 6: Korelace zásoby vody z naměřené vlhkosti a hmotnosti v období 27.2.2019 – 27.3.2019.....	- 44 -
Graf 7: Závislost hmotnosti segmentu S2 na srážkových úhrnech	- 45 -

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Mocnost souvrství využitelná pro kořenění rostlin u různých způsobů ozelenění a forem vegetace (Zdroj: Šimečková a Večeřová, 2016).....	- 18 -
Tabulka 2: Základní vlastnosti hodnocené podle Zákona č. 156/98 Sb. Zákon o hnojivech (Upraveno z: http://www.acre.cz)	- 25 -
Tabulka 3: Chemické a fyzikální vlastnosti substrátu od společnosti BB Com (Upraveno z: www.bbcom.cz)	- 26 -
Tabulka 4: Výsledky kalibračních koeficientů včetně objemů klapátek.....	- 31 -
Tabulka 5: Měsíční srážkové úhrny a maximální denní srážkové úhrny ve sledovaném období.....	- 32 -
Tabulka 6: Měsíční odtok ze segmentů	- 33 -
Tabulka 7: Průměrná měsíční teplota, maximální a minimální teplota vzduchu na zelené střeše ve výšce 5 cm a nad betonovou dlažbou ve sledovaném období.....	- 36 -
Tabulka 8: Průměrná teplota v substrátech segmentů	- 37 -
Tabulka 9: Maximální a minimální teplota v substrátech segmentů.....	- 37 -
Tabulka 10: Charakteristiky srážkových událostí a výpočet součinitelů odtoku pro jednotlivé epizody v zimním režimu.....	- 46 -
Tabulka 11: Charakteristiky srážkových událostí a výpočet součinitelů odtoku pro jednotlivé epizody v období s vyššími teplotami.....	- 46 -