

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy**

Water regime of vegetated layer of extensive green roof

Autor: Bc. Jitka Hanzlíková

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

Praha 2018



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hanzlíková Jméno: Jitka Osobní číslo: 410771

Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy

Název diplomové práce anglicky: Water regime of the vegetation layer of an extensive green roof

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši odborné literatury na téma zelených střech se zaměřením na jejich vodní režim a odtok srážkové vody ze zelených střech. V případové studii porovnejte vodní a teplotní režim a dynamiku odtoku srážkové vody za období půl roku pozorování na zkušebních ploškách zelených střech na budově UCBEB, ČVUT v Praze. Zkušební plochy založte ve čtyřech opakováních. Na základě měření porovnejte situaci u souvrství čerstvě osázeného rozchodníky se situací u souvrství s plně zapojeným rozchodníkovým kobercem. V případě potřeby zařadte další případovou studii dle vlastního výběru. Výsledky měření interpretejte pomocí matematického modelování a diskutujte.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Články v časopisech indexovaných v databázích WOS a SCOPUS.
- 2) FLL: Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing. Bonn: Research Society for Landscape Development and Landscape Construction, (2008)

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.2.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



### *Čestné prohlášení*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s pomocí uvedených použitých zdrojů informací a za odborného vedení doc. Ing. Michala Sněhoty, Ph.D.

V případě řádné citace souhlasím s použitím této práce ve smyslu zákona č. 121/2000 Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Bc. Jitka Hanzlíková



### *Poděkování*

Předně bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Michalovi Sněhotovi, Ph.D., za odborné vedení, poskytnutí nespočetně cenných rad a informací a zajištění prostředků k založení experimentu. Prof. Ing. Mileně Císlarové, CSc. děkuji za závěrečné konzultace a odborné rady.

Velké díky patří také paní Haně Donátové za pomoc v laboratoři při přípravě experimentů, stejně tak jako Ing. Tomášovi Princovi, za pomoc v laboratoři a odborné konzultace. Janu Šáchovi děkuji za technickou podporu a pomoc při zakládání experimentu. Díky patří i mé kolegyni, Bc. Petře Hečkové, která se zakládání experimentu také aktivně účastnila.

Ráda bych zde poděkovala také Ing. Jaromíru Duškovi, Ph.D. za pomoc při matematickém modelování.

Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Václavu Pokornému z ČHMÚ za poskytnutí příslušných meteorologických dat pro rok 2018. Paní Haně Kocmanové děkuji za poskytnutí rozchodníkových koberců pro založení experimentu. Panu Bc. Vokálovi děkuji za poskytnutí filtrační textilie do souvrství v segmentech zelených střešech.

Tato práce byla vytvořena v rámci výzkumu v Univerzitním centru energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze, za finanční podpory Grantové agentury České republiky (GAČR), reg. č. projektu GA17-21011S a za finanční podpory grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/143/OHK1/2T/11.

Děkuji také své rodině a svým blízkým za podporu během studia.



## Anotace

Významným úkolem při adaptaci na změnu klimatu, zejména ve městských oblastech, je vývoj antropogenních systémů půda-rostlina, jejichž příkladem jsou i zelené střechy. Podrobné studie zabývající se hydrologickou rovnováhou zelených střech jsou v současnosti rozšířeným výzkumným tématem, jejich vliv dosahuje do mnoha oblastí lidské činnosti včetně vodního hospodářství. Zelené střechy se stávají více populárními díky své schopnosti redukovat a transformovat celkový roční odtok v porovnání se střechami klasickými. Pro posouzení vodního a teplotního režimu extenzivní zelené střechy byly na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze (dále jen UCEEB), vybudovány čtyři experimentální plochy zelených střech. Do každého ze vzniklých segmentů byl uložen substrát, který byl následně osazen vegetací. Byly použity dva druhy substrátů a vegetace ve dvou stádiích rozvoje rostlin. Prvním stádiem byly rozchodníkové řízky a druhým rozchodníkový koberec. Do prvních dvou segmentů (S1 a S2) byl uložen substrát na bázi na spongolitu a do třetího a čtvrtého segmentu (S3 a S4) byl uložen substrát založený na bázi drčeného liaporu. Segmenty S2 a S3 byly osazeny rozchodníkovým kobercem a na segmenty S1 a S4 byly aplikovány rozchodníkové řízky. Do segmentů o rozměrech 1 x 1 m byl nasypán substrát o mocnosti 4 cm (S2,S3) a 6 cm (S1,S4). Experiment byl založen v září roku 2017. Pro vyhodnocení vodního a teplotního režimu segmentů extenzivních zelených střech byly kontinuálně monitorovány základní charakteristické veličiny. Vlhkost v substrátech byla monitorována pomocí reflektometrické metody, kdy v každém ze segmentů byla uložena 2 vlhkostní čidla. Odtoky z jednotlivých segmentů zelených střech byly monitorovány pomocí překlopných člunků měřících celkový odtékající objem vody. Jeden ze segmentů byl osazen vážními čidly. V každém ze segmentů byla monitorována teplota substrátu. Meteorologická stanice, která je umístěna v bezprostřední blízkosti experimentu na zelené střeše budovy UCEEB disponuje měřením srážkových úhrnů, rychlosti a směru větru, solární radiace, teplot a relativních vlhkostí vzduchu. K určení hydraulických charakteristik substrátů byly z každého segmentu odebrány tři neporušené půdní vzorky, na kterých byla stanovena retenční čára jednotlivých segmentů. Výsledky měření byly interpretovány numerickou simulací. Výsledky výzkumu dokazují, že uspořádání segmentu S1 působí z hlediska retence vody nejefektivněji. Segment S1 je schopen zadržet až 54 % celkového objemu srážky. Nejvyšší vlhkosti substrátu byly pozorovány v segmentu S3 při současném dosažení nejvyššího odtoku. Segmenty S2 a S3 vykazují v teplejších měsících průměrně nižší hodnoty teploty substrátů oproti segmentům S1 a S4 a vyšší hodnoty teplot substrátu v měsících, kdy se průměrné hodnoty teploty vzduchu dostávají pod bod mrazu.



## *Abstract*

Development of anthropogenic soil-plant system, such as a green roofs, is a significant task in adaptation to climate change especially in urban areas. A detailed study of hydrological balance of green roofs is a present-day research topic with impacts into many field of human activity, including water management. Green roofs have become more and more popular because of their ability to reduce the total annual runoff as well as peak storm water runoff in comparison to regular roofs. To evaluate the water and thermal regime of an extensive green roofs, four test beds has been established on the roof of University Centre for Energy Efficient Buildings of the Czech Technical University in Prague. The study compares four test beds of which two were established with different green roof substrates and were planted with plants at two different stages of growth (Sedum cutting and Sedum carpet). The first and the second test bed (S1 and S2) was established with substrate based on spongolite. The third and the fourth test bed (S3 and S4) was established with substrate based on expanded clay. The test beds S2 and S3 were covered by Sedum carpets and the rest was scattered by Sedum cuttings. Test beds dimensions are 1 x 1 m and depth of substrates reaches 4 cm (S2,S3) and 6 cm (S1,S4). The experiment has been started in September 2017. To determine water and thermal regime of extensive green roof test beds characteristic values were monitored. The volumetric water content is measured by eight Time Domain Reflectometry probes (two in each test bed). Outflow from each test bed is measured by tipping bucket flow meter. The weight changes are additionally measured on one test bed. The soil substrate temperature is measured on each test bed. Wind speed, wind direction, solar radiation, relative air humidity and air temperatures are measured on a weather station located on the roof. Three undisturbed samples from each segment were taken for laboratory measurements to determine hydraulic properties. The results of measurements are interpreted by numerical simulation. The results of the research shows that the segment S1 is the most effective in water retention. The segment S1 is able to retain up to 54 % of total rainfall. The highest volumetric water content is observed in the segment S3 though reaching also the highest observed outflow. Lower temperatures of substrate are observed in segments S2 and S3 during the warmer months while segments S2 and S3 reaches higher temperatures of substrate when the average air temperatures are below freezing.



### *Klíčová slova*

- *zelená střecha*
- *vodní režim*
- *evapotranspirace*
- *teplotní režim*
- *substrát*
- *vegetace*
- *matematické modelování*

### *Keywords*

- *green roof*
- *water regime*
- *evapotranspiration*
- *thermal regime*
- *substrate*
- *vegetation*
- *mathematical modeling*



# 1 Obsah

2	Úvod .....	13
3	Cíle diplomové práce.....	15
4	Teorie .....	16
4.1	Vlhkost půdy.....	16
4.2	Metody měření půdní vlhkosti.....	17
4.2.1	Přímé metody.....	17
4.2.2	Nepřímé metody .....	17
4.3	Hydraulické charakteristiky.....	18
4.3.1	Retenční čára půdní vlhkosti.....	18
4.3.2	Potenciál půdní vody.....	19
4.3.3	Měřicí metody.....	19
4.3.4	Hydraulická vodivost a řídicí rovnice proudění vody v půdě .....	19
4.4	Richardsova rovnice pro nestacionární proudění .....	20
4.5	Evapotranspirace .....	20
5	Rešerše .....	22
5.1	Funkce zelených střech .....	22
5.2	Funkční vrstvy zelené střechy .....	23
5.3	Vodní režim a odtok srážkové vody ze zelené střechy.....	24
5.4	Vliv zelené střechy na klimatické poměry lokality, evapotranspirace a teplotní režim zelených střech. ....	26
5.5	Vegetace.....	28
5.6	Fyzikální a chemické vlastnosti substrátu zelené střechy.....	29
6	Metody a materiál.....	33
6.1	Založení experimentu.....	33
6.2	Lokalita experimentu .....	40
6.3	Substráty a vegetace .....	40
6.3.1	Použité substráty.....	40





---

6.3.2	Vegetace.....	41
6.4	Sledované období.....	43
6.5	Kalibrace zařízení měřícího odtok ze segmentů zelených střech .....	43
6.6	Měření teplot .....	43
6.7	Odběr vzorků a laboratorní měření pro stanovení bodů retenční čáry substrátů.....	44
6.7.1	Měření vlhkostního potenciálu substrátů na pískovém tanku .....	45
6.7.2	Měření vlhkostního potenciálu suchých substrátů .....	45
6.7.3	Optimalizace parametrů van Genuchtenovy křivky .....	48
6.8	Objemová vlhkost aktuální vs. objemová vlhkost naměřená .....	49
6.9	Jednorozměrná simulace vodního režimu segmentů zelených střech .....	49
6.10	Evapotranspirace .....	50
6.11	Chemická analýza.....	51
7	Výsledky .....	53
7.1	Retenční křivky jednotlivých segmentů .....	53
7.2	Objemová vlhkost aktuální vs. objemová vlhkost naměřená .....	55
7.3	Vodní režim segmentů zelených střech .....	55
7.3.1	Teplotní režim segmentů zelených střech a evapotranspirace .....	62
7.4	Vegetace.....	66
7.1	Jednorozměrná simulace .....	69
8	Diskuze a závěr.....	76
9	Seznam použitých zdrojů .....	79



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Sedum Sexangulare .....	42
Obrázek 2: Sedum Album.....	42
Obrázek 3: Sedum Al. Coral Carpet.....	42
Obrázek 4: Sedum Lydium .....	42
Obrázek 5: Sedum Lydium Glauca .....	42
Obrázek 6: Sedum Hispanicum Minus .....	42
Obrázek 7: Sedum Acre .....	42
Obrázek 8: Sedum Reflexum .....	42
Obrázek 9: Sedum Ref. Angelina .....	42
Obrázek 10: Vzorky připravené k sycení vodními párami.....	47
Obrázek 11: Vzorky uložené v exsikátoru před počátkem experimentu .....	47
Obrázek 12: Uchování vzorků připravených k měření .....	47
Obrázek 13: Vzorky připravené pro převoz na UCEEB.....	47
Obrázek 14: Kalibrační roztok .....	48



## Seznam grafů

Graf 1: Retenční křivky substrátů pro segmenty S1 a S2 .....	60
Graf 2: Retenční křivky substrátů pro segmenty S3 a S4 .....	61
Graf 3: Naměřené odtoky ze segmentů zelených střech v porovnání se srážkovými úhrny .....	11
Graf 4: Průběh vlhkostí v jednotlivých segmentech zelených střech v závislosti na teplotě a srážkovém úhrnu.....	11
Graf 5: Průběh vlhkostí v segmentu S1 a S2 v závislosti na srážkovém úhrnu a odtoku vody ze segmentu .....	12
Graf 6: Průběh vlhkosti v segmentu S3 a S4 v závislosti na srážkovém úhrnu a odtoku vody ze segmentu .....	13
Graf 7: Porovnání teplot naměřených v substrátech segmentů a teploty v úrovni betonové dlažby a 2 m nad úrovní zelené střechy v období od 26.10.2017 do 20.4.2018.....	11
Graf 8: Závislost míry vypočtené evapotranspirace na meteorologických veličinách měřených meteostanicí v místě experimentu .....	12
Graf 9: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S1 se simulací z modelu HYDRUS1D .....	15
Graf 10: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S2 se simulací z modelu HYDRUS1D .....	16
Graf 11: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S4 se simulací z modelu HYDRUS1D .....	17
Graf 12: Porovnání vlhkostí segmentu S1 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017 .....	18
Graf 13: Porovnání vlhkostí segmentu S2 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017 .....	19
Graf 14: Porovnání vlhkostí segmentu S3 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017 .....	20
Graf 15: Porovnání vlhkostí segmentu S4 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017 .....	21
Graf 16: Porovnání modelových vlhkostí ze všech segmentů pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017 .....	22



## *Seznam tabulek*

Tabulka 1: Funkční vrstvy (Zelené střechy: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016) .....	31
Tabulka 2: Parametry sypané substrátové směsi (Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016) .....	39
Tabulka 3: Vlastnosti substrátů .....	47
Tabulka 4: Hodnoty RH nasycených par roztoků solí (OMEGA Engineering).....	53
Tabulka 5: Hydraulické charakteristiky materiálů zadané do modelu HYDRUS-1D.....	57
Tabulka 6: Protokol o zkoušce: Ústav technologie vody a prostředí VŠCHT, (2017) .....	59
Tabulka 7: Průměrné hodnoty vlhkostí.....	62
Tabulka 8: Průměrné měsíční teploty [°C] .....	11
Tabulka 9: Maximální měsíční teploty [°C] .....	11
Tabulka 10: Minimální měsíční teploty [°C] .....	12

## 2 Úvod

Tradiční postupy urbanizace vedou k rostoucímu podílu zastavěných ploch resp. zpevněných povrchů a při současné změně sezónního rozložení srážek roste také potřeba regulace vodního režimu v sídelním prostředí. V důsledku znemožnění infiltrace srážkové vody dochází k objemnému povrchového odtoku při snížení doby její koncentrace a zvýšení rychlosti odtoku. Do měst jsou proto zaváděny adaptační opatření ke zmírnění dopadů klimatické změny při současné snaze trvale udržitelného rozvoje a zachování potřebné kvality života obyvatel.

Plochy přírodního charakteru ve městech významně ovlivňují místní mikroklima. Základním mechanismem je odpařování vody, neboli evapotranspirace, z vodních ploch. Tento proces snižuje teplotu okolního prostředí. Zeleň akumuluje solární energii a odráží ji zpět do atmosféry v menší míře, než se tomu děje u zpevněných povrchů a antropogenních materiálů. Svým fungováním má zeleň ve městech významný klimatizační efekt.

Jako alternativa k tradičnímu hospodaření s dešťovou vodou ve městech a zlepšení místního mikroklima se nabízí funkční propojení ploch s převažujícími přírodními složkami pro zajištění vsakování. Jedním z řešení může být použití vegetační neboli zelené střechy (Zelené střechy: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016).



Obrázek 1: Zelená střecha v urbanizovaném prostředí (Lockett, K., Green Roof Construction and Maintenance)



Zelené střechy, mimo působení na životní prostředí, působí pozitivním účinkem také na obyvatelstvo ve městech a to tím, že snižují prašnost a stávají se místy k setkávání lidí a jejich relaxaci.

Typ vegetace, kterou lze na zelené střeše pěstovat, je podmíněn mocností vegetačního souvrství. Při mocnostech použitého substrátu do 15 cm se hovoří o zelené střeše extenzivní, která se osazuje rostlinami houževnatými, které odolávají dlouhodobému zamokření stejně tak jako období sucha. Vegetační střechy osazené zelení vyššího vzrůstu se označují jako intenzivní.

Správné fungování zelené střechy může být ohroženo strukturálními změnami tenké vrstvy substrátu. Teplotní a vodní režim může být narušen použitím nevhodné technologie nebo nevyhovujícím materiálem.

V rámci diplomové práce byly založeny experimentální segmenty extenzivních zelených střech ve čtyřech opakováních lišících se typem substrátu a použitou vegetací. Vlastní výzkum je tvořen monitorováním vodního a teplotního režimu experimentálních ploch a následným porovnáním dat spolu s meteorologickými údaji zaznamenávanými meteostanicí v místě experimentu. Pro porovnání naměřených výsledků byla provedena simulace vodního režimu. Matematickému modelování předcházelo laboratorní měření hydraulických charakteristik.

Pro bližší porozumění problematice proudění vody v pórovém prostředí je část práce zaměřena na teoretické poznatky. Výsledky podobných experimentů byly zjištěny formou rešerše vědeckých článků.

Závěrem práce je zhodnocení a porovnání vodního a teplotního režimu jednotlivých experimentálních ploch.



### **3 Cíle diplomové práce**

Diplomová práce je zacílena na založení experimentálních segmentů zelených střech ve čtyřech opakováních lišících se typem substrátu a stádia vzrůstu vegetace, půlroční monitoring a vyhodnocení jejich vodního, teplotního režimu a dynamiky odtoku srážkové vody. Dalším cílem je vyhodnocení zapojení vegetace v souvrství zelené střechy a ověření výsledků vodního režimu matematickým modelováním

## 4 Teorie

V následující kapitole jsou popsány základní teoretické poznatky, které úzce souvisí s tématem práce. Půdní prostředí je svými vlastnostmi podobné vlastnostem pórovitého prostředí střešních substrátů, proto jsou procesy probíhající v substrátech zelených střešních popsané právě základními poznatky týkajícími se pórovitého prostředí.

Informace byly čerpány ze zdroje Kutílek et al. (1996), Kutílek (1984), Kutílek (1963) a Schaap et al. (2006).

### 4.1 Vlhkost půdy

Půdní voda obvykle zaplňuje póry částečně nebo zcela. Množství vody vztažené k jednotkové hmotnosti nebo k jednotkovému objemu půdy se nazývá půdní vlhkost. Půdní vlhkost je definována podobně, jako koncentrace a jedná se o bezrozměrnou veličinu, která je často vyjadřována v procentech. Teoretické rozmezí hodnot vlhkosti se pohybuje od 0, kdy se ve vzorku nenachází žádná voda, do hodnoty 1, kdy se objem vody rovná objemu pórů.

Vlhkost půdy lze rozdělit do dvou kategorií. *Hmotnostní vlhkost* odpovídá poměru hmotnosti vody ku hmotnosti tuhé fáze půdy. *Objemová vlhkost* je definována poměrem objemu vody ku objemu vzorku půdy.

- *Vlhkost hmotnostní*

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (3.1)$$

kde symbolem  $m_s$  značíme hmotnost půdy o nulové vlhkosti, to znamená půdy zcela vysušené při 105°C do konstantní hmotnosti. Symbol  $m_w$  vyjadřuje hmotnost vody v půdě.

- *Vlhkost objemová*

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (3.2)$$

kde symbol  $V_w$  značí objem vody zastoupený v pórech vzorku půdy a symbol  $V_s$  značí objem neporušeného půdního vzorku.



Pro výpočet objemové vlhkosti porušeného půdního (3.3) vzorku lze použít vzájemný vztah plynoucí z rovnic (3.1) a (3.2), kde je hmotnostní vlhkosti porušeného půdního vzorku přímo úměrná objemové hmotnosti půdy  $\rho_d$  a nepřímo úměrná objemové hmotnosti vody  $\rho_w$ .

$$\theta = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad (3.3)$$

## 4.2 Metody měření půdní vlhkosti

Podle způsobu měření lze metody rozdělit na přímé, kde je měřenou veličinou množství vody v půdě, a metody nepřímé, u kterých je měřena určitá fyzikální veličina funkčně závislá na vlhkosti.

### 4.2.1 Přímé metody

Jednou z možností přímého stanovení vlhkosti je gravimetrická metoda. Jedná se o metodu destruktivní a je základním postupem pro kalibraci různých nepřímých metod měření. Princip gravimetrického stanovení vlhkosti spočívá ve vážení vlhkého a suchého substrátu a následném vypočtení hmotnostní vlhkosti dle vztahu (3.1).

### 4.2.2 Nepřímé metody

Metod nepřímého měření vlhkosti existuje celá řada, např. měřením elektrického odporu, elektrické kapacity, pohlcování  $\gamma$ -záření, tepelná vodivost, zpomalení rychlých neutronů a reflektometrické metody. Prakticky je nutné u nepřímých metod vyhodnotit kalibrační křivku jako empirickou závislost vlhkosti na měřeném parametru.

Metoda TDR (Time Domain Reflectometry) je založena na měření rychlosti šíření elektromagnetické vlny o vysoké frekvenci podél dvou až tří hrotů zapravených rovnoběžně do půdy.

Rychlost elektromagnetického impulzu je určena dielektrickou konstantou, která určuje zpomalení prostupu elektromagnetických vln v určitém prostředí ve srovnání s rychlostí prostupu ve vakuu. Voda, vyplňující půdní póry, signál výrazně zpomaluje. Vzhledem ke zpomalení elektromagnetických vln lze určit zdánlivou délku hrotů, která se jeví větší oproti skutečnosti. Výstupem měření TDR sondou je hodnota poměru zdánlivé délky hrotu ( $L_a$ ) a délky skutečné ( $L$ ). Druhá mocnina poměru délek hrotů je základním vstupem do polynomu pro výpočet objemové vlhkosti.

$$\sqrt{K_a} = \frac{L_a}{L} \quad (3.4)$$

Vztah mezi dielektrickou konstantou a objemovou vlhkostí substrátu byl popsán Toppem et. al. (1980)

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} K_a - 5,5 \cdot 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} K_a^3 \quad (3.5)$$

### 4.3 Hydraulické charakteristiky

#### 4.3.1 Retenční čára půdní vlhkosti

Retenční čára půdní vlhkosti je funkční závislost rovnovážných stavů mezi objemovou vlhkostí půdy a vlhkostním potenciálem (sacím tlakem nebo sací tlakovou výškou). Tímto způsobem je popsána schopnost pórovitého materiálu zadržovat vodu (schopnost retence) proti působení vnějších sil.

V případě větších rozsahů vlhkostních potenciálů (sací tlak  $0 - 10^5$  Pa) se tento graf zobrazuje v logaritmickém měřítku. Graf pro menší rozsah tlakových výšek ( $0 - 200$  cm) lze vynést v lineárním měřítku. Retenční čáry půdní vlhkosti jsou empiricky popisovány různými rovnicemi se snahou co nejlépe vystihnout závislost tlakové výšky na vlhkosti  $\theta(h)$ . Obvykle se používá relativní veličina nazvaná efektivní vlhkost  $\theta_E$ .

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.6)$$

Kde je  $\theta_E$  efektivní vlhkost,  $\theta$  vlhkost,  $\theta_s$  nasycená vlhkost,  $\theta_r$  reziduální vlhkost.

Van Genuchten et. al. (1980) uvedl pro průběh retenční čáry ve vlhké oblasti výraz:

$$\theta_E = \frac{1}{\left(1 + (\alpha|h|)^n\right)^m} \quad (3.7)$$

Kde je  $h$  je tlaková výška [cm];  $\alpha$  [ $\text{cm}^{-1}$ ],  $n$  a  $m$  jsou optimalizační parametry.

Retenční čára bývá zatížena hysterezí, v této práci nebylo nutné její vliv uvažovat.

### 4.3.2 Potenciál půdní vody

Potenciál půdní vody vyjadřuje souhrnné působení sil (např.: adsorpce, smáčení atd.) a energie, s níž půda poutá vodu. Rozdíl potenciálů mezi dvěma body je hnací silou proudění vody v půdě. Rovnovážný stav je podmíněn nulovou hodnotou hnací síly, tzn. stavu, kdy jsou si potenciály ve všech bodech systému rovny, gradient potenciálu je rovný nule. Voda v půdě neproudí a vlhkost v čase zůstává konstantní.

### 4.3.3 Měřící metody

Pro stanovení retenční čáry v širším rozsahu sacích tlakových výšek je nutné použít několik metod. Pro vlhkosti blízké nasycení se používá pískový tank. Pískový tank obsahuje nádržku s ložem z velmi jemného písku, na které se ukládají vzorky. Nádržka je u dna drénována perforovanou trubicí. Vyústění dnem nádržky je provedeno trubicí bez perforace, která je spojená s ohebnou U-trubicí vyplněnou vodou. U-trubice slouží jako kapalinový manometr. Rozdíl úrovně hladiny ve volném rameni U-trubice a středu vzorku je tlaková výška působící na pórovou vodu. Záporná tlaková výška způsobí odvodnění půdního vzorku.

Pro větší rozsah tlaků se používá přetlakový přístroj, kdy se místo podtlaku pod pórovitou destičkou přístroje používá přetlak vzduchu nad vzorkem.

Pro velmi vysoké absolutní hodnoty sacích tlakových výšek se užívá rovnovážného stavu mezi vlhkostí pórovité látky a relativní vlhkosti vzduchu. Vlhkost pórovitého materiálu v rovnovážném stavu s parciálním relativním tlakem vodních par lze stanovit exsikátorově.

Na dno exsikátoru je umístěn nasycený roztok se známým parciálním relativním tlakem vodních par spolu s pórovitým vzorkem. Po dosažení rovnovážného stavu vlhkosti v pórovitém materiálu lze určit odpovídající sací tlakovou výšku, resp. vlhkostní potenciál.

### 4.3.4 Hydraulická vodivost a řídicí rovnice proudění vody v půdě

Hydraulická vodivost půdy vyjadřuje schopnost půdy vést vodu. Je definována jako měřená nasycená hydraulická vodivost  $K_s$  a funkce nenasyčené hydraulické vodivosti  $K$ , která vyjadřuje závislost na stupni nasycení půdy.

Nasycená hydraulická vodivost  $K_s$  [L/T] vyjadřuje schopnost pohybu vody v půdě při úplném zaplnění půdních pórů vodou. Lineární závislost mezi rychlostí a hydraulickým sklonem popisuje Darcyho zákon (1856):

$$q = -K_s \text{grad}H \quad (3.8)$$

Kde  $q$  je vektor objemového toku,  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost. Hydraulický gradient ( $gradH$ ) udává poměr  $\Delta H/L$ . Vztah mezi nasycenou hydraulickou vodivostí a vlhkostí se určuje odhadem na základě teorie kapilárních modelů podle Mualem-van-Genuchtenova vztahu:

$$K(\theta) = K_s S_E^{1/2} \left( 1 - S_E^{1/m} \right)^m \quad (3.9)$$

kde  $S_E$  je efektivní nasycení ( $=\theta_E$ ) a  $m$  je parametr určený empiricky z tvaru retenční čáry.

Nenasycená hydraulická vodivost  $K$  vyjadřuje schopnost pohybu vody v půdě při částečném zaplnění pórů vodou.

Nenasycené proudění je popsáno vztahem Darcyho-Buckinghamova:

$$q = -K(\theta) gradH \quad (3.10)$$

Kde  $q$  je vektor objemového toku,  $K(\theta)$  je funkce nenasyčené hydraulické vodivosti,  $gradH$  označuje hydraulický gradient,  $H=h+z$ ,  $h$  je tlaková výška a  $z$  je geodetická výška [cm]

#### 4.4 Richardsova rovnice pro nestacionární proudění

Dosazením Darcy-Buckinghamova zákona do rovnice kontinuity vznikne Richardsova rovnice, kterou lze vypočítat průběh vlhkosti nebo sacího tlaku během neustáleného nenasyčeného proudění vody v prostoru a čase, vertikální proudění je popsáno tvarem:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3.11)$$

kde je  $\theta$  vlhkosti,  $t$  čas,  $h$  tlaková výška a  $K$  hydraulická vodivost. .

#### 4.5 Evapotranspirace

Evaporace vyjadřuje přenos vody z povrchu půdy do atmosféry, závislý na vlastnostech půdy, její vlhkosti, barvě, expozici, povrchu apod. Transpirace označuje ztráty v důsledku odpařování vody z povrchu rostlin do atmosféry. Evapotranspirace je vyjadřována jako vrstva vypařené vody [ $\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$ ].

Při popisu evapotranspirace rozlišujeme mezi aktuální a potenciální evapotranspirací. Potenciální evapotranspirace je maximální výpar, který by nastal za předpokladu neomezeného přísunu vody. Aktuální evapotranspirace vyjadřuje množství vody, které se reálně odpaří.



Pro výpočet potenciální evapotranspirace lze použít FAO Penman-Monteithovu metodu (Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO Penman-Monteith equation). K výpočtu se využívají změřené klimatologické veličiny a to solární radiace, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost větru, dosazené do vzorce

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3.17)$$

Kde je  $ET_o$  referenční hodnota potenciální evapotranspirace,  $R_n$  radiační bilance,  $G$  tok tepla do půdy,  $T$  průměrná denní teplota vzduchu nad povrchem,  $u_2$  rychlost větru ve výšce 2 m nad vypařujícím povrchem,  $e_s$  napětí nasycených vodních par,  $e_a$  aktuální napětí vodních par,  $e_s - e_a$  sytostní doplněk,  $\Delta$  derivace tlaku nasycené vodní páry,  $\gamma$  psychometrická konstanta

## 5 Rešerše

Zelená střecha neboli střešní zahrada či vegetační střecha, jsou pojmy označující střechy pokryté vegetačním souvrstvím s vegetací.

### 5.1 Funkce zelených střech

Zelené střechy zastávají ve městech několikero funkcí. Mezi obecně nejvíce známé patří funkce urbanistická a krajinařská. Zelené plochy mají pozitivní vliv na životní prostředí a stávají se v mnoha případech také místy pro pobyt a relaxaci obyvatel. Zelené střechy svou přítomností zlepšují obytné i pracovní prostředí a zvyšují atraktivitu města. Z environmentálního hlediska je vyzdvihována schopnost zlepšení mikroklimatu ve srovnání se střechami s holou hydroizolací nebo vrstvou štěrku. Zelené střechy pomáhají vyrovnávat extrémní teploty ve městech, zvyšují vlhkost vzduchu a snižují prašnost. Významné fungování mají zelené střechy taky ve vztahu k odtoku srážkové vody. Zelené střechy srážkovou vodu zadržují, zpomalují její odtok a vracejí tak vodu do přirozeného koloběhu vody. Následný odtok do kanalizace zadržovaných srážkových vod probíhá s časovým zpožděním. Tomu lze rozumět tak, že ve srovnání s nezeleněnými plochami, snižují špičkové odtoky ze srážkových událostí. Důsledkem této schopnosti je snížení náporu na kanalizační síť.

Zeleným střechám lze přisuzovat i funkce ochranné a ekonomické. Vegetační souvrství snižuje hlučnost díky nižší zvukové odrazivosti vegetačních ploch, zlepšuje tepelnou ochranu budovy v zimě a především v létě, což snižuje množství energie spotřebované v důsledku užívání klimatizace. V neposlední řadě vegetační souvrství ochraňuje hydroizolaci před degradací, snižuje nebezpečí jejího mechanického poškození a zvyšuje účinnost fotovoltaických panelů v důsledku snižování extrémních teplot prostředí (Zelené střechy: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016).

## 5.2 Funkční vrstvy zelené střechy

Jednotlivé funkční vrstvy jsou přehledně definovány tabulkou ve Standardech pro navrhování, provádění a údržbu zelených střech (2016).

Tabulka 1: Funkční vrstvy (Zelené střechy: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016)

Funkční vrstva	Funkce
Vegetace	je souborem rostlin, který tvoří pokryv zelené střechy
Vegetační vrstva	je základním prostředím pro kořenění a růst rostlin a svým fyzikálním, chemickým a biologickým složením a vlastnostmi je k tomu uzpůsobena
Filtrační vrstva	zabraňuje vyplavování drobných částic z vegetační vrstvy do vrstvy drenážní a trvale chrání drenážní vrstvu před zanesením
Hydroakumulační vrstva*	akumuluje srážkovou nebo závlahovou vodu pro potřeby rostlin
Drenážní vrstva	umožňuje dostatečně rychlý a efektivní odtok přebytečné vody k odvodňovacím zařízením
Ochranná vrstva	trvale chrání hydroizolaci střechy před mechanickým poškozením
Separační vrstva*	navzájem od sebe odděluje sousední materiály nebo prvky, které by se mohly vzájemně negativně ovlivňovat
Kořenovzdorná vrstva**	ochranná vrstva proti prorůstání kořenů, chrání hydroizolaci střechy před poškozením kořeny rostlin

\* Nemusí být součástí vegetačního souvrství, používá se v opodstatněných případech.

\*\* Samostatná ochranná vrstva proti prorůstání kořenů rostlin se používá spíše výjimečně, a to v případech, kdy stávající hydroizolace střechy není odolná proti prorůstání. Stává se to převážně u vegetačních souvrství zřizovaných na stávajících střechách s původní hydroizolací. U nově zřizovaných zelených střech nebo u rekonstrukcí, na kterých se předpokládá zřízení vegetačního souvrství, se dnes již používají hydroizolační výrobky (folie i asfaltové pásy) s potřebnou odolností proti prorůstání kořenů rostlin a příslušným atestem.

Podle mocnosti souvrství a druhu vegetace se zelené střechy rozdělují na extenzivní, polointenzivní a intenzivní. Extenzivní zelená střecha se vyznačuje vegetací s maximální mírou autoregulace a schopností setrvat v odpovídající kvalitě bez pravidelné závlahy jen s minimální péčí člověka. Vegetaci extenzivních zelených střech tvoří rostliny s vysokou regenerační schopností a schopné přizpůsobit se extrémním podmínkám stanoviště. Mocnost vegetačního souvrství extenzivních zelených střech se obvykle pohybuje v rozmezí 60–150 mm. Pro vhodně zvolené druhy sukulentů může být dostačující mocnost souvrství jen 40 mm (i méně), naopak pro stepní trávo-bylinné typy porostů může být použito souvrství o mocnosti až 200 mm (Zelené střechy: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016).

### 5.3 Vodní režim a odtok srážkové vody ze zelené střechy

Mezi faktory ovlivňující retenční schopnosti zelených střech patří počet vrstev a typ materiálů, hloubka substrátu, typ substrátu, vegetační pokryv, typ vegetace, geometrie střechy (sklon/délka svahu, pozice na střeše – zastíněná/ nezastíněná oblast, orientace vůči světovým stranám), věk. Z hlediska klimatických podmínek lze zvažovat tyto faktory: doba trvání suchého období, vegetační sezóna, klima (teplota vzduchu, větrné podmínky, vlhkost), charakteristiky dešťových událostí (intenzity a doby trvání). (Czemieli Berndtsson, 2010)

Studie Villarreala et al. (2005) uvádí, že retenční schopnost zelené střechy souvisí do značné míry s intenzitou srážkové události. Při nižších intenzitách srážek dosahuje zelená střecha vyšší retenční schopnosti. Dle simulace vyplývá, že při sklonech střechy 2° a 14° a při srážkové intenzitě 0,4 mm/min může substrát zadržet až 62 – 39 % srážky, zatímco při srážkové intenzitě 1,3 mm/min a sklonech střechy 2° a 14° dojde k zadržení pouze 21 – 10 % srážky.

Intenzita odtoku ze zelené střechy po srážkové události závisí především na tloušťce substrátu. Retence zelené střechy je významná zejména v letním období, zatímco v zimě je retence zelené střechy nízká. Výzkum v Bruselu dle Mentense et al. (2006) dokazuje, že extenzivní zeleň na střechách 10 % budov je schopna zredukovat celkový odtok o 2,7 % pro danou oblast a o 54 % z jednotlivých budov.

Gregoire et al. (2011) se na zelené střeše v Connecticutu zaměřil na kvalitu a kvantitu vody v závislosti na odezvy z jednotlivých srážkových událostí. Autoři po dobu jednoho roku (2009 – 2010) zkoumali odtok ze zelené střechy. Ve zkoumaném období proběhlo celkem 97 srážkových událostí s celkovým úhrnem 1307 mm. Zelená střecha o ploše 248 m<sup>2</sup> při tloušťce substrátu 10,2 cm ve sledovaném období zadržela 51,4 % srážek. Součástí experimentu byla i analýza odtoku v závislosti na celkovém množství dusíku, fosforu, mědi a olova. Tyto prvky byly do substrátu zelené střechy aplikovány pomocí hnojiv. Výzkum dospěl k závěru, že zelené střechy snižují množství kontaminantů v půdě.

Wang et al. (2017) se ve své studii zabývali retenčními schopnostmi extenzivních zelených střech při aplikaci dvojí vrstvy složené z různých materiálů. Svrchní vrstva se skládá převážně z organické hmoty pro poskytnutí výživy rostlin a spodní vrstva, z anorganického materiálu, který slouží pro zadržování vody a redukci škodlivých látek. Pro porovnání výsledků byla zhotovena extenzivní zelená střecha s jednovrstvým substrátem. V průběhu experimentálního období byl zjištěn u extenzivní zelené střechy s dvouvrstvým substrátem lepší přirozený růst vegetace a dosažení celkového pokrytí 90 % rostlinami, zatímco u jednovrstvé skladby zelené střechy





došlo pouze k 80 % pokryvu. Průzkum retenčních schopností probíhal pro 4 simulace dešťových událostí při výšce srážek 43,2; 54,6; 76,2; 86,4 mm. Dvouvrstvý substrát obsahující směsi aktivního uhlí s perlitem a vermikulitu jako adsorpčního substrátu prokázal lepší retenční schopnosti (65,9 % a 55,4 %) v porovnání s jednovrstvým substrátem, který zadržel 52,5 % srážky.

Experimentální studie Millera (1998) zaměřená na zelené střechy ve Filadelfii o tloušťce vegetačního souvrství 7,6 cm doložila, že k odtoku ze zelené střechy nedošlo v případě, že srážkový úhrn z jedné srážkové události nepřekročil hodnotu 15 mm. Při srážkovém úhrnu mezi 15 mm a 25 mm byl odtok ze zelené střechy výrazně opožděn. Maximální pozorovaná pětiminutová intenzita deště dosahovala 1,0 mm/min, zatímco maximální pětiminutová intenzita odtoku dosahovala 0,3 mm/min. Miller dokládá, že maximální zásoba vody v substrátu dosahovala hodnot k 60 mm.

Bengtsson et al. (2005) měřil od poloviny července 2001 až do prosince 2002 odtok ze zelené střechy o tenké vrstvě substrátu se skladbou rozchodníků a mechů. Bengtsson et al., (2005) uvádí celkovou vodní bilanci, kdy za sledované období spadlo 720 mm srážek, odtok dosahoval hodnoty 370 mm, což znamená, že se odpařilo 310. V období od března do září odpovídala evapotranspirace potenciální evapotranspiraci. V letních měsících dosahoval odtok ze zelené střechy hodnot o 30 – 50 mm nižších v porovnání se srážkovým úhrnem. Dle závěrů studie vyplývá, že evapotranspirace má významný vliv při redukci odtoku ze zelených střech. V průběhu krátkých srážkových událostí je voda způsobující odtok dočasně zachycena vegetací a substrátem, což snižuje a zpomaluje celkový špičkový odtok.

Špičkový odtok srážkové vody ze zelených střech bývá obvykle zpožděn v porovnání s odtokem ze standartní střechy. Retence vody závisí na časovém rozložení intenzity deště, počáteční vlhkosti substrátu, tloušťce substrátu a hydraulických vlastnostech substrátu. Navíc dle výzkumu Angerse et al. (1998) částice půdy spolu s póry tvoří zpočátku nestabilní půdní strukturu, která se výrazně mění působením rostlin a atmosférických vlivů.

Podrobná studie zabývající se složkami hydrologické rovnováhy antropogenních půdních systémů, jakými jsou i zelené střechy, je současným tématem mnoha výzkumů a má vliv na řadu oblastí lidské činnosti, včetně vodního hospodářství. Zelené střechy mohou významně snížit celkový roční odtok, stejně jako špičkový odtok dešťové vody v porovnání s běžnými střechami. Carter et al. (2006) provedl výzkum, na kterém bylo dokázáno, že extenzivní zelená střecha zadrží až 88 % srážky z drobné srážkové události, více než 54 %

srážek v případě středních srážkových událostí a skoro 48 % bylo zelenou střechou zadrženo při výrazných dešťových událostech.

Monitorováním na experimentální střeše Univerzity v Janově Pallem et al. (2009) byla zkoumána interakce mezi hydrologickými procesy a instalacemi zelené střechy pro lepší pochopení proudění vody v nenasyceném prostředí substrátů zelených střech. Na experimentálním místě docházelo ke kontinuálnímu měření srážkové intenzity a odtoku ze zelené střechy v časovém kroku 1 min. Vlhkost substrátu byla měřena pomocí čtyř TDR čidel umístěných vertikálně. Model SWMS\_2D, který je založen na Richardsově rovnici a Van Genuchtenových-Mualemových funkcí, byl kalibrován a ověřen pomocí nasbíraných srážkových dat. Závěrem studie je fakt, že model adekvátně kopíruje hydrogramy. Výsledky hydrologického modelu mohou posloužit k optimalizaci konstrukčního postupu pro optimální fungování zelené střechy.

Ve svém experimentu z let 2014-2015 se Jelinkova et al. (2016) zabývala teplotním a vodním režimem v tenké vrstvě substrátu zelené střechy. Měření probíhalo na dvou segmentech zelených střech o ploše 1 m<sup>2</sup> a hloubce substrátu 5 cm, kdy každý se segmentů obsahoval jiný substrát. Segment S1 byl naplněn směsí ornice a drtí keramzitu a cihel. Segment S2 obsahoval substrát pro zelené střechy Optigreen. Odtokové výšky z roku 2015 dosahovaly hodnot S1-52,7 mm a S2-100,4 mm, což odpovídá 23 a 43 % zadržovaných srážek (231,7 mm). Zpočátku byl odtok generovaný segmentem S2 ze středních srážkových událostí (srážkový úhrn mezi 10-25 mm) dvakrát vyšší než odtok generovaný segmentem S1. Srážky se srážkovým úhrnem nižším než 4 mm byly kompletně odpařeny (evaporovány) zpět do atmosféry. Studie dále dokládá, že hodnoty aktuální evapotranspirace byly výrazně nižší než hodnoty potenciální evapotranspirace stanovené ze vztahu Penman-Monteithovy rovnice. Tyto rozdíly byly způsobeny vlhkostním stresem v kořenové zóně a vlastními rozdíly teoretické míry evapotranspirace posečené trávy a skalniček.

#### **5.4 Vliv zelené střechy na klimatické poměry lokality, evapotranspirace a teplotní režim zelených střech.**

Množství vzdušného znečištění, které bylo zachyceno zelenou střechou bylo vyhodnoceno pomocí modelu suché depozice. Výsledky dokazují, že 1675 kg škodlivých látek v atmosféře bylo odstraněno během jednoho roku díky zelené střeše o rozloze 19,8 ha. (Yang, Yu, & Gong, 2008)

Městské klima bývá zpravidla teplejší než v klima na periferiích měst a ve vesnicích. Těmto jevům se říká „tepelné ostrovy“. Městská zástavba v průběhu dne absorbuje solární záření a zpět uvolňuje akumulované teplo v průběhu noci. Tento efekt můžeme vidět ve všech městech všech



klimatických regionů a zvyšuje se úměrně s rostoucí urbanizací měst. S rostoucí teplotou městského prostředí roste spotřeba energie v důsledku používání klimatizací a chladicích systémů, a to má za následek nárůst emisí zapříčiňujících skleníkový efekt. Zakládáním ozeleněných ploch ve městech pomáhá snižovat efekt tepelných ostrovů, jelikož zezeň prostřednictvím evapotranspirace ochlazuje prostředí. (Lehmann, 2014)

Studie Lehmana et al. (2014) dokazuje, že zelená střecha ovlivňuje teplotu vzduchu v interiéru a také při samotném povrchu zelené střechy. Vzduch uvnitř budovy byl v průměru o 3,06 °C chladnější než v budově bez zelené střechy a nad zelenou střechou byl vzduch o 3,7 °C chladnější než nad klasickou střechou. Dále také řeší hodnoty vlhkosti, kdy nad zelenou střechou byl vzduch o 11,94 % vlhčí.

Zelené střechy mají dle Soleckého et al. (2005) vliv na zmírňování městských tepelných ostrovů. Zvýšený vegetační pokryv a povrchové materiály s vyšším albedem mohou snížit dopad biofyzikálních rizik ve městech, včetně tepelného stresu souvisejícího s vyššími teplotami a znečištěním ovzduší, které má vliv na lidské zdraví. Tento postoj může snížit také poptávku po výrobě energie spojené s klimatizací.

Výsledky studie z Pekingu provedené Sunem et al. (2014) potvrdily, že hloubka substrátu významně ovlivňuje transport tepla a vlhkosti. Bylo zjištěno, že na zamezení odpařování z povrchu má vliv právě hloubka substrátu, jelikož se voda přerozděluje do spodních vrstev a čím je voda hlouběji v substrátu, tím nižší výpar nastává. Tenké vrstvy substrátu naopak rychle vysychají a snižuje se tak hydrologická funkce zelené střechy. Na základě těchto znalostí je třeba zvážit, jakou hloubku substrátu při výstavbě zelené střechy zvolit. Další analýza provedená v Pekingu poukazuje na to, že náklady spojené se závlahou zelené střechy o tloušťce substrátu v rozmezí 0,15 – 0,30 cm jsou nižší než náklady na provoz klimatizace u nezavlažované zelené střechy. Pro oblasti s mírným klimatem se tato skutečnost nabízí jako řešení pro zlepšení energetické účinnosti budov.

V rámci italské Univerzity v Calabrii proběhl výzkum teplotního režimu zelených střech. Analýza dokazuje, že je zelená střecha schopna snížit teplotu v lokalitě, ve srovnání s referenční plochou střechy pokryté černým asfaltovým pásem, v průměru o 12°C a v zimě udržuje teplotu vyšší v průměru o 4°C. Změřené hodnoty teplot umožnily provedení výpočtu přenášeného tepla skrze střechu budovy dokládající negativní tepelné toky ve sledovaném období a redukci tepelné energie vstupující do budovy o 100 % v průběhu léta, což dokládá pasivní chladicí efekt zelené střechy. V zimě byla zelená střecha schopna redukovat tepelnou energii o 30 – 37 %. (Bevilacqua, Mazzeo, Bruno, & Arcuri, 2016)



Výzkumníci Baleárské univerzity ve svém výzkumu uvádějí, že významný vliv na snížení teploty zelené střechy má právě vegetace. Studie porovnává dva druhy vegetace, *Sedum Sediforme* a *Brachypodium phoenicoides*, kdy *Sedum Sediforme* v analýzách vyšel jako lepší z hlediska tepelné izolace, a to hlavně na jaře a v letním období. Dále byly porovnávány tepelné toky v modulech zelených střech, kdy modul, kde bylo zavlažovacím režimem docíleno 25 % potenciální evapotranspirace, vykazoval nižší tepelné toky oproti modulu, kde bylo závlahami docíleno 50 % potenciální evapotranspirace. Hlavními závěry studie jsou tvrzení, že tepelné vlastnosti zelené střechy lze významně ovlivnit výběrem vegetace a zavlažovacím režimem. (Azeñas et al., 2018)

Evapotranspirace zelených střech závisí na vegetaci, typu substrátu a meteorologických podmínkách oblasti. Studie z Čínské univerzity dokládá, že z celkového množství tepelné energie získané extenzivní zelenou střechou se 58,4 % uvolňuje v procesu evapotranspirace, 9,5 % energie je spotřebováno na fotosyntézu, zbývající část je uvolněna zpět do atmosféry dlouhovlnným zářením. (Feng, Meng, & Zhang, 2010)

Další studie dokládá efektivitu evapotranspirace při ochlazování prostředí. Experiment založený na případové studii suchého substrátu zelené střechy, kdy se předpokládá, že je evapotranspirace velmi limitována, dokládá redukci získaného tepla o 60 % zejména díky odrazu solární energie a její absorpci vegetací a substrátem. V případě vlhkého substrátu byl průstup tepelného toku do budovy snížen díky zvýšené míře evapotranspirace. (Lazzarin, Castellotti, & Busato, 2005)

Jelinkova et al. (2016) ve své studii použila pro stanovení hodinové potenciální evapotranspirace vztah Penman-Monteitha, který stanovuje latentní tepelný tok pomocí střední denní teploty, rychlosti větru, relativní vlhkosti vzduchu a slunečního záření. Hodnoty potenciální evapotranspirace byly porovnány s hodnotami evapotranspirace změřené. Z výsledků vyplývá, že hodnoty aktuální evapotranspirace jsou významně nižší oproti vypočtené potenciální evapotranspiraci. Tento rozdíl byl dán vlhkostním stresem způsobeným nedostatkem vody v substrátu.

## 5.5 Vegetace

Nedávný výzkum provedený Luem et al. (2015) ukázal, že rostliny pěstované v tenčí vrstvě substrátu (4 cm) dosahovaly větších rozměrů biomasy a kořenového systému (celková délka, povrch, objem a počet kořínků). Tento jev byl pravděpodobně způsoben v důsledku mělké vrstvy substrátu, která umožnila kořenům rostlin prorůst až do drenážní vrstvy, která je za vlhkostně



příznivých podmínek zdrojem vláhy pro rostliny. Nicméně, za podmínek dlouhodobého sucha se stav rostlin v mělkém substrátu výrazně zhoršil. Pokud je zelená střecha zařízena tak, že drenážní vrstva může zároveň sloužit i jako vrstva zásobující vegetaci vláhou a lze provádět mírné dodatečné zavlažování, je možné použít slabou vrstvu substrátu pro docílení dobrého stavu vegetace na střešní zahradě. Není-li zde však možnost jakékoliv dodatečné závlahy, je doporučeno opatřit extenzivní střešní zahradu větší mocností substrátu pro docílení normálního stavu vegetace.

Ve svém pokusu se Rumble et al. (2017) zaměřil na stanovení míry zlepšení množství a biodiverzity vyšších trofických druhů přidáním mikroorganismů do substrátu včetně mykorrhizy, *Trichoderma* spp. a půdní bakterie. V rámci pokusu bylo zjištěno, že některé mikrobiální látky byly úspěšnější při tvorbě sítě vyživujících látek, nicméně tyto změny nijak pozitivně neovlivnily výsledný stav vegetace *Sedum* spp. Autoři této studie předpokládají, že zelené střechy si s postupem času vytvářejí mikrobiální komunitu, která může omezit úspěšnost aplikace komerčních injektáží mikroorganismů.

Jelinkova et al. (2016) ve své studii uvádí, že využití zeleně pro půdy zelené infrastruktury je omezeno schopností rostlin zvládat hydrologické podmínky, které panují v mělkých substrátech. V těchto podmínkách jsou života schopné rostliny jako trvalky, trávy, mechy a sukulenty. Sukulenty (např. *Album Sedum*, *Sedum Acre*) jsou vhodné pro využití na zelených střechách, jelikož mají omezenou transpiraci a vysokou zásobu.

## 5.6 Fyzikální a chemické vlastnosti substrátu zelené střechy

Ze studie Mentense et al. (2006) vyplývá, že při stárnutí zelené střechy dochází k chemickým změnám, vymývají se půdní částice a vlivem vegetace narůstá objem organického materiálu. Dle studie stárnutí střechy významně neovlivňuje hodnoty ročního odtoku. Během stárnutí substrátu zelené střechy dochází ke zvyšování pórového prostoru, což značně přispívá ke zvyšování zásobního prostoru substrátu pro dešťovou vodu. Dále také ze studie provedené v letech 1987 – 2003 vyplývá, že intenzivní zelená střecha je schopna redukovat celkový roční odtok o 65 – 86 % a extenzivní zelená střecha je schopna roční odtok zredukovat o 27 – 81 %.

De-Villem et al. (2017) byl zkoumán vliv stárnutí systému zelené střechy na její schopnost retence a odvedení dešťové vody. Výzkum byl proveden pomocí rentgenové mikrotomografie (XMT) na třech opakujících se vrstvách dvou odlišných substrátů. Použité substráty lze definovat z hlediska věkových skupin na substrát nový a 5 let starý, vzaty z jiné zelené střechy. Ačkoliv byly na počátku pozorovány významné strukturální rozdíly u obou substrátů (hustota, velikost pórů



a zrn, tortuozita), tyto rozdíly výrazně neovlivnily hydrologické charakteristiky (maximální vodní kapacitu, nasycenou hydraulickou vodivost). Nasycená hydraulická vodivost 5 let starého substrátu, dle snímkování XMT, dosahovala nižších hodnot oproti substrátu novému. Snížená nasycená hydraulická vodivost zvyšuje schopnost zadržení vody. Pro třicetiletou návrhovou srážku s dobou trvání 1 hodina dosáhl špičkový odtok ze starého substrátu hodnotu o 33 % nižší v porovnání s odtokem z nového substrátu.

### **Požadované vlastnosti sypaných substrátových směsí**

Požadavky na střešní substráty jsou poměrně přísné. Střešní substrát by měl mít optimální objemovou hmotnost, měl by být odolný vůči větrné a vodní erozi při zachování svého objemu a měl by mít dostatečnou hydroakumulační schopnost i dostatečnou propustnost pro vodu.

Střešní substráty by dále měly mít nízký podíl jemných vyplatitelných částic, které tvoří prachové a jílovité částice s průměrem menším než 0,063 mm, aby nedocházelo k ucpávání vpustí. Tento podíl by neměl u extenzivních zelených střech překročit 15 % celkového objemu. (FLL, 2008)

Zároveň z hlediska požadavků rostlin by v substrátu při plném nasycení vodou mělo být dostatečné množství vzduchu.

Střešní substráty jsou definovány i nízkým podílem organických složek, < 65 g/l, především ve vegetační vrstvě udržovaných střech (FLL, 2008).

Střešní substráty by dále měly mít nízký podíl klíčících semen plevelů nebo jejich oddenků a schopnost poutat a následně uvolňovat živiny.

Substráty nesmí obsahovat další látky, které by zatěžovaly životní prostředí a musí splňovat limity obsahu rizikových prvků (viz vyhláška 131/2014 Sb).

Doporučená hodnota maximální vodní kapacity pro extenzivní střešní substrát by měla být > 35 % objemu (FLL, 2008).

Podrobné požadavky na vegetační vrstvu jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 2: Parametry sypané substrátové směsi (Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, 2016)

Parametr	Jednotka	Střešní substrát – typ/skladba zelené střechy		
		Extenzivní/jednovrstvá	Extenzivní/vícevrstvá	Intenzivní/vícevrstvá
objemová hmotnost v suchém stavu	g·l <sup>-1</sup>	400–800	400–900	400–1000
objemová hmotnost v nasyceném stavu	g·l <sup>-1</sup>	600–1300	750–1550	850–1650
maximální vodní kapacita	% obj.	20–50	35–65	45–65
obsah vzduchu při MVK	% obj.	> 15	> 10	> 10
propustnost	m·min <sup>-1</sup>	60–120	8–70	5–30
podíl částic d < 0,063 mm	% hm.	< 6	< 15	< 20
spalitelné (organické) látky*	% hm.	< 6	< 8	< 13
hodnota pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (pH <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> )*		6,5–9,0 (6,0–8,5)		
elektrická vodivost (EC)*	mS·cm <sup>-1</sup>	≤ 0,5		
obsah N	mg·l <sup>-1</sup>	≤ 100	≤ 150	≤ 150
obsah P	mg·l <sup>-1</sup>	≤ 30	≤ 35	≤ 50
obsah K	mg·l <sup>-1</sup>	≤ 300	≤ 450	≤ 450
obsah Mg	mg·l <sup>-1</sup>	≤ 200	≤ 200	≤ 200
obsah semen plevelů	počet·l <sup>-1</sup>	≤ 1	≤ 1	≤ 1

\* parametry, které je nutné deklarovat při uvádění substrátů na trh formou ohlášení na základě jejich zařazení do systému typových substrátů definovaných vyhláškou 131/2014 Sb.

Anorganické substráty byly ve studii Gracesona et al. (2014) používány jako primární složka pěstebních substrátů zelených střech, jelikož mohou poskytnou požadované fyzikální vlastnosti a jsou považovány za fyzicky, chemicky a strukturálně stabilní v čase. Anorganické substráty mohou být doplněny o organickou hmotu pro vytvoření vegetace. Jaký vliv může mít tento úkon na suchou objemovou hmotnost, vodní kapacitu, pórovitost a stav vegetace nebylo doposud příliš zkoumáno. Devět druhů cihelné drti a tři druhy drcených střešních tašek jako substráty dodávané britskými dodavateli kameniva byly použity a obohaceny o 30 % kompostovaného zeleného odpadu. Doplnění anorganických substrátů o organickou hmotu prokazatelně zlepšilo fyzikální vlastnosti výsledného substrátu, a to především snížením objemové hustoty v suchém stavu a zvýšením retenční kapacity. Pórovitost anorganických substrátů klesla s dodávkou zeleného kompostovaného materiálu, nicméně tato změna nijak neohrozila růst rostlin.

Studie zabývající se použitím půdních mikrobů pro zlepšení vlastností substrátu zelených střech Molineuxe et al. (2017) odhalila, že typ vegetačního substrátu a jeho hloubka hrají významnou roli v mikrobiální ekologii zelených střech. Experimentální plocha umístěná v Londýně o rozloze 180 m<sup>2</sup> je rozdělena na segmenty o rozměrech 2 m x 2 m, kdy každý ze segmentů obsahuje různé druhy substrátů při 5 rozdílných hloubkách. K prezentaci výsledků byly vybrány experimentální plochy se dvěma substráty založenými na bázi cihelné drti a betonové drti při hloubkách substrátu 5,5 a 8 cm. Experimentální plošky byly rozděleny na čtvrtiny a následně byla každá z těchto čtvrtin použita pro pokusy s inokulací mikrobů. Dodávka mikrobů do substrátu byla provedena celkem třikrát během roku 2007. K experimentu byly použity arbuskulární mikorhizní houbové směsi, „kompostový čaj“ obsahující bakterii a houbu (TEA) a kombinace obou



předchozích řešení. Pro porovnání výsledků jeden ze segmentů nebyl ošetřen mikrobiální injekcí. Výsledky studie ukazují, že přidáním půdních mikrobů do substrátu lze zlepšit stav vegetace. Kombinace použitých substrátů, jejich hloubek a půdních mikroorganismů ovlivnila výšku rostlin, počet listů a množství živin v půdě. Nelze však přesně říci, která kombinace substrátů, hloubek a bakterií vychází z hlediska studie nejefektivněji. Tato krátkodobá studie dokazuje, že přidáním půdních bakterií do substrátu lze pozitivně ovlivnit stav vegetace a lze takto zvýšit druhovou rozmanitost extenzivní zelené střechy.

Bengtsson et al.(2005) při svém experimentu na zelené střechě ve Švédsku o tloušťce substrátu 3 cm, který byl uložen na 1 cm lámaného kamene, zkoumali fyzikální vlastnosti substrátu a odtok ze segmentů zelené střechy. Zkoumané segmenty byly definované jako obdélníky 4 x 1.25 m se sklonem 2.6 %. Složení substrátu bylo následovné: 5 % jílu, 5 % lámaný vápenec (8-12 mm), 43 % lámané střešní tašky (8-12 mm), 37 % písek a 10 % organická hmota. Standardními laboratorními zkouškami bylo zjištěno, že porozita substrátu dosahovala 60-70 %. Polní vodní kapacita dosahovala hodnot 40-50 % a bod vadnutí nastal při 15 %. Zásoba vody definovaná mezi bodem polní vodní kapacity a bodem vadnutí dosahovala hodnoty 9 mm.



## 6 Metody a materiál

### 6.1 Založení experimentu

Experiment byl založen na střeše budovy UCEEB na 4 segmentech zelených střech. infrastruktura byla dříve vytvořena v rámci postdoktorského projektu GAČR č. GP14-10455P (řešitel Ing. Vladimíra Jelínková PhD.) V rámci řešení diplomové práce byla provedena některá vylepšení experimentálního vybavení a byla vyměněna souvrství.

Každý ze segmentů má rozměry 1 x 1 m a hloubku 0,1 m. Po založení experimentu byly dále plochy, až na závlahy vegetace v počátcích jejich ujímání, uvažovány jako bezúdržbové.



Obrázek 3: Letecký snímek experimentálního stanoviště (autor snímku J. Krása)

Plochy segmentů jsou definovány ocelovými plechy tloušťky 1 mm, které také zajišťují nepropustnost segmentů.



Obrázek 4: Holá konstrukce segmentu

Celá konstrukce je tvořena pravouhlým systémem trubek z oceli a závitové tyče poskytují možnost nastavení sklonu segmentu v rozmezí 0-5°. Jeden ze segmentů obsahuje také 4 vážní čidla zabudovaná v každé z nohou segmentů. Jedná se o vážní čidla typu LCMAD-100, Omega Engineering Ltd., Manchester, UK. Segmenty jsou vyvýšené cca 25 cm nad úroveň zelené střechy, aby bylo možno měřit odtok vody. Voda ze segmentů odtéká perforovanou nerezovou mřížkou přímo do žlabu, který sbírá odtékající vodu a přivádí ji přímo k dělenému překlápěcímu člunku, který je chráněn plastovým krytem a vespod měřícího zařízení je ze dvou stran otevřen, aby umožňoval volné vytékání vody.



Obrázek 5: Detail perforované mřížky, žlabu a krytu s překlápěcím člunkem

Svodný žlab je zakryt nerezovým plechem, aby bylo zabráněno navýšení měřeného odtoku ze segmentů srážkovou vodou, která by dopadla na plochu žlabu. Segmenty jsou izolovány od okolního proudění vzduchu 10 cm silnou vrstvou extrudovaného polystyrenu.



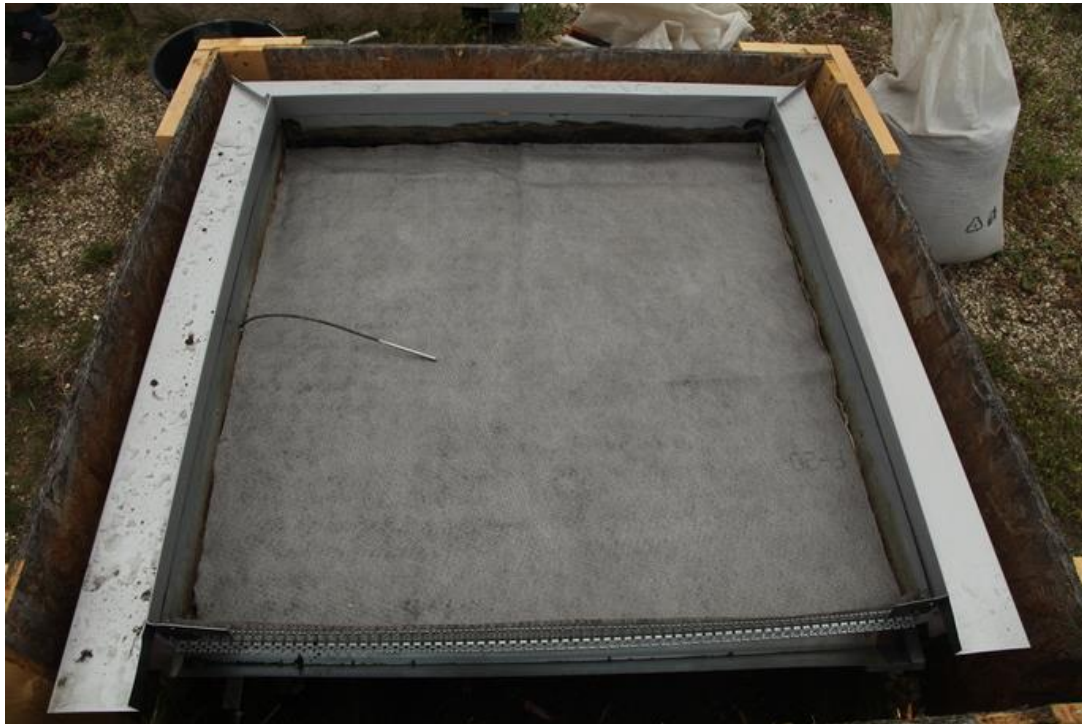
Obrázek 6: Detail izolace segmentu

Celá konstrukce je opláštěna OSB deskami.



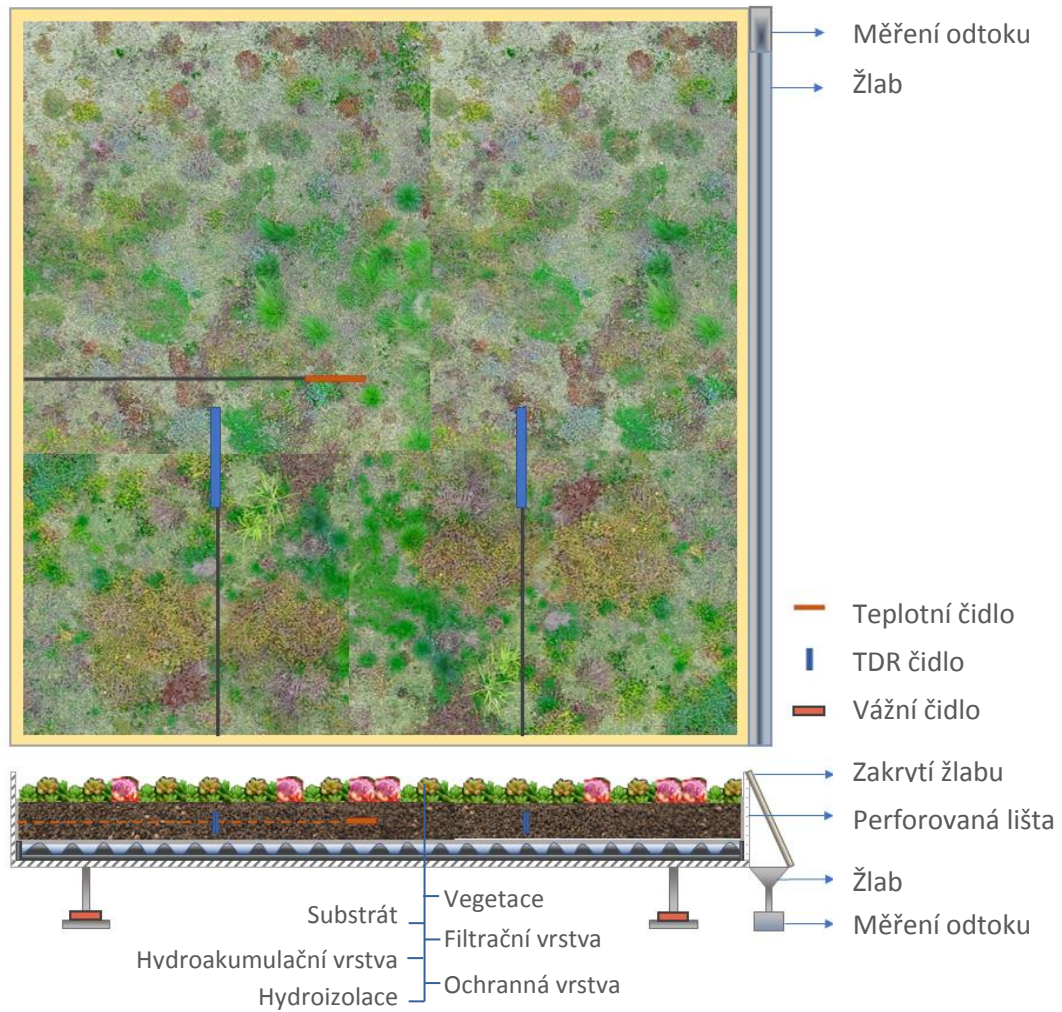
Obrázek 7: Opláštění segmentu OSB deskami

Každý se segmentů je vybaven teplotním čidlem 107-L (Campbell Scientific Ltd., Shepshed, UK) k měření teploty substrátu v úrovni 1,5 cm ode dna nepropustné vrstvy segmentu.



**Obrázek 8: Pohled na teplotní čidlo v segmentu**

Navíc byly zhruba doprostřed segmentů umístěny vždy dvě TDR sondy do každého ze segmentů k měření objemové vlhkosti substrátu. Čidla (Campbell Scientific) jsou umístěna cca 30 cm od okrajů. Rozložení čidel je schematicky zobrazeno na obrázku 9 jak schématickým půdorysem, tak schématickým řezem.



Obrázek 9: Schéma umístění čidel v segmentech; půdorys a schématický řez

Do každého ze segmentů byl nově uložen substrát a po instalaci čidel byly experimentální plochy osázeny vegetací. Do segmentů s označením S1 a S2 byl uložen substrát pro extenzivní zelené střechy od společnosti ACRE.



Obrázek 10: Ukládání substrátu ACRE

Do segmentů s označením S3 a S4 byl uložen substrát pro extenzivní zelené střechy společnosti BB Com.



Obrázek 11: Ukládání substrátu BB Com

Segmenty S2 a S3 byly následně osazeny rozchodníkovými koberci.



Obrázek 12: Půlení rozchodníkového koberce (2 x 1,1 m)

Na segmenty S1 a S4 byly aplikovány řízky rozchodníků sesbírané právě z použitých rozchodníkových koberců, aby bylo docíleno stejné druhové skladby vegetace. Do segmentů S1 a S4 byl uložen substrát o mocnosti 6 cm.



Obrázek 13: Segment s rozmístěnými řízky rozchodníků

Vzhledem k vyšší tloušťce rozchodníkového koberce oproti sesbíraným řízkům bylo do segmentů S2 a S3 uloženo pouze 4 cm substrátu, aby se vykompenzovala výška celého souvrství při použití rozchodníkových koberců, ačkoliv u rozchodníkového koberce převládá rozměr vegetace nad rozměrem média, na kterém je koberec předpěstován.

## 6.2 Lokalita experimentu

Experimentální měření probíhá na zelené střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB) v Buštěhradu, (50°9.41797'N, 14°10.19195'E) s nadmořskou výškou 365 m.n.m. Místní klima je klasifikováno jako mírné s průměrnými ročními srážkami 500 mm a průměrnou teplotou 8°C. Budova univerzitního centra byla postavena v roce 2014. Zelená střecha umístěná na hlavní budově univerzitního centra je vyvýšená 10 m nad úroveň terénu. Zelená střecha má obdélníkový tvar o celkové ploše 941 m<sup>2</sup> a byla navržena jako extenzivní zelená střecha s tloušťkou substrátu 5 cm. Aby bylo možné získat všechny relevantní informace vztahující se k pozorování zelené střechy, je zelená střecha vybavena meteostanicí zaznamenávající údaje o teplotě vzduchu ve výškách 5 cm a 2 m nad povrchem zelené střechy, rychlosti větru a jeho směru, čistém záření, relativní vlhkosti vzduchu a intenzitě deště (Sněhota, M. et al., 2015).

## 6.3 Substráty a vegetace

### 6.3.1 Použité substráty

Experiment byl založen s použitím střešních extenzivních substrátů od společností ACRE a BB Com. Střešní substrát ACRE obsahuje spongilit (55 %), liadrain (20 %), keramzit (20 %) a rašelinu (5 %). Střešní substrát BB Com je složen z drceného liaporu, cihelné drti, rašeliny, kompostu.

Další vlastnosti substrátů hodnocené podle metodik FLL jsou uvedeny v tabulce níže, viz tabulka 3.

Tabulka 3: Vlastnosti substrátů (M. Dubský, 2014); (Vokál, J., 2011)

Substrát	Hustota	Obj.hmot.	Obj.hmot.	Max.vodní		Obsah	Hydraulická
	pevných č.	suchá	nasycená	kapacita	Pórovitost	vzduchu	
	g/ml	g/l	g/l	(MVK)	% obj.	při MVK	
BB Com	2,13	600	1020	42,0	71,8	29,8	61,4
ACRE	-	450-850	800-1300	30-45	50-70	15-30	60-10



### 6.3.2 Vegetace

*Rozchodníkový koberec* je označení pro předpěstovanou vegetační rohož na vytlévajícím kokosovém nosiči protkaném PP sítkou s vrstvou substrátu a směsí s vegetací. Použitá rohož, od společnosti SedumTop, je široká 1,1 m, dlouhá 2 m a její mocnost se pohybuje v rozmezí 2,5 – 4 cm. Rohože jsou z 90 % pokryty vegetací. V suchém stavu dosahují hmotnosti v rozmezí 15 – 18 kg a při nasyceném stavu 18 – 22 kg. Předpěstovaný rozchodníkový koberec zajistí okamžitý zelený efekt (Technický list: SedumTopMat/S5).



**Obrázek 14: Detail tloušťky rozchodníkového koberce**

Řízky rozchodníků byly sesbírané z rozchodníkových koberců, aby bylo docíleno stejné druhové skladby vegetace.

Rostlinné složení rozchodníkových koberců SedumTop:

(Sedum Top: Evergreen roof solutions)



Obrázek 1: Sedum Sexangulare



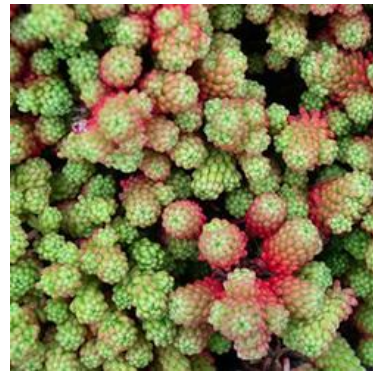
Obrázek 2: Sedum Album



Obrázek 3: Sedum Al. Coral Carpet



Obrázek 4: Sedum Lydium



Obrázek 5: Sedum Lydium Glauca



Obrázek 6: Sedum Hispanicum Minus



Obrázek 7: Sedum Acre



Obrázek 8: Sedum Reflexum



Obrázek 9: Sedum Ref. Angelina



Obrázek 24: Sedum Spurium Fuldagut



Obrázek 25: Sedum Hybridum Immergrunnen



Obrázek 26: Sedum Kamtschaticum

## 6.4 Sledované období

Po založení experimentu nastalo období nutných kalibrací měřících zařízení. Počátek vyhodnocení dat, která se vztahují k měření odtoku srážkové vody ze segmentů zelených střech, se vztahuje k ukončení revizí, čištění, oprav a kalibrace překlápěcích člunků, zařízení zaznamenávajícího odtok ze segmentů tj. 19.10.2017. Sledované období je ukončeno dnem 20.4.2018.

Vyhodnocení měření vlhkosti je vzhledem k datu kalibrace čidel a úprav v programu započato o týden později, datem 26.10.2017. Sledované období je ukončeno stejně, jako v předchozím případě, tj. 20.4.2018.

Vegetace byla po založení experimentu pravidelně zavlažována, aby se zeleň ujala. V průběhu pozorování nebyl stav vegetace již nijak ovlivňován

## 6.5 Kalibrace zařízení měřícího odtok ze segmentů zelených střech

Konstrukce segmentů včetně měřících zařízení musejí odolávat povětrnostním podmínkám, které na zelené střeše panují. Kritickým se poté stává měření množství odtékající vody, kdy je nutné pravidelně kontrolovat žlaby sbírající odtékající vodu, aby nebyly zaneseny hrubým materiálem. Jemný prach se usazuje také na dělených překlopných čluncích a uvnitř, což může značně ovlivňovat schopnost člunku se překlopit a také jeho objem. V zimě může docházet k zamrznání vody v překlopných čluncích, a to může způsobit mechanické poškození člunku. Z výše uvedených důvodů byla provedena kalibrace překlopných člunků. Kalibrací byl nově získán odtok ze segmentů v podobě spočteného reálného objemů překlopných člunků. Nově získaný objem byl aplikován do záznamů odtoků měřícího zařízení. Kalibrací bylo zjištěno, že ze segmentů odtéká větší množství vody, než které je zaznamenáváno měřením s původní kalibrací. Odtok z jednotlivých segmentů je navýšen koeficienty:  $S_1 - 1,25$ ;  $S_2 - 1,28$ ;  $S_3 - 2,7$ ;  $S_4 - 1,58$ . Při kalibraci segmentu S3 na jaře 2018 bylo zjištěno, že člunek protéká, pravděpodobně vlivem mechanického poškození. Nelze tedy přesně určit množství odtékající vody, jelikož značné množství odteče, aniž by došlo k překlopení člunku. Z výše popsaného důvodu jsou výsledky z měření segmentu S3 vyřazeny.

## 6.6 Měření teplot

K analýzám teplotního režimu zelené střechy slouží záznamy teplot v substrátech jednotlivých segmentů, záznamy z výšky 2 m nad úrovní zelené střechy v místě experimentu a záznamy teplot referenční plochy, jíž je betonová dlažba mimo zelenou střechu budovy UCEEB.

## 6.7 Odběr vzorků a laboratorní měření pro stanovení bodů retenční čáry substrátů

Pro účel této práce byly změřeny retenční čáry substrátů zelené střechy.

Dne 31.10.2017 bylo celkově odebráno 12 neporušených půdních vzorků v Kopeckého válečcích, z každého segmentu celkem 3 vzorky. Ze segmentů S2 a S3 byly vzorky odebrány i s rozchodníkovým kobercem. Ačkoliv se nejedná o homogenní materiál, byly takto odebrané vzorky považovány za reprezentativní v rámci zjednodušení laboratorního měření a následných simulací. Hydraulické charakteristiky samotného rozchodníkového koberce nebyly v této práci laboratorně stanoveny z důvodu jeho malé mocnosti.

V laboratoři byly na připravené vzorky v Kopeckého válečcích připevněny gumičkou nylonové sítky. Tloušťka substrátu ve 100 % případů nedosahovala výšky válečku 4 cm, pravděpodobně vlivem slehnutí substrátu a částečného vyfoukání větrem. Proto bylo nutné pro vyhodnocování dat změřit výšku půdního vzorku ve válečku.

Na připravených vzorcích střešního substrátu v Kopeckého válečcích lze laboratorně stanovit retenční čáru na pískovém tanku a na přístroji WP4C.

Vzorky byly poté zváženy a uloženy do nádoby s destilovanou vodou k sycení. Po několika dnech sycení byly vzorky zváženy a uloženy na pískový tank pro určení bodů retenční čáry v blízkosti nasycení.



Obrázek 27: Sycení neporušených půdních vzorků

### 6.7.1 Měření vlhkostního potenciálu substrátů na pískovém tanku

Po dosažení plného nasycení byly vzorky uloženy na dno pískového tanku, ten byl následně zakryt víkem, aby byl eliminován výpar. Před každou změnou sacího tlaku byly vzorky z tanku vyjmuty a na Petriho misce zváženy hmotnosti samotných vzorků i se sítkami a gumičkami. Na pískovém tanku byly postupně nastavovány sací tlakové výšky 2 cm; 3,5 cm; 10 cm; 33 cm; 50 cm. Zpočátku vzorky drénovaly 24 hodin, postupně se doba drénování prodlužovala až do zajištění konstantní hmotnosti vzorku, tzn. do stavu, kdy již ze vzorku vlivem sacího tlaku neodtéká žádná voda.

Po skončení měření byly vybrány vzorky, jeden z každého segmentu, na kterých měření pokračuje v přetlakovém aparátu. Tento krok již není součástí diplomové práce. Ze zbylých vzorků byly sundány sítka a gumičky a zváženy. Tyto hodnoty byly zaznamenány do formuláře. Vzorky byly následně uloženy do pece k vysušení při 105°C na dobu 24 hodin. Následně byly vzorky ze sušárny vyndány a znovu zváženy. Takto byla zjištěna hmotnost sušiny. Hodnoty hmotnosti byly zaznamenány do formuláře.

### 6.7.2 Měření vlhkostního potenciálu suchých substrátů

Přístroj WP4C (Decagon Devices) se používá pro měření potenciálu suchých půd. Přístroj WP4C měří parciální tlak nasycených vodních par po vyrovnání potenciálu tekuté fáze vody ve vzorku s fází vodní páry v čelní části uzavřené komory. Vzorek umístěný v hliníkovém kalíšku je vložen do uzavřené komory přístroje, která obsahuje chlazené zrcátko na němž je detekována kondenzace. První známky kondenzace na zrcátku jsou detekovány fotoelektrickým článkem. Kondenzací páry je narušen světelný paprsek, který se přes zrcátko odráží zpět do čidla, které zaznamenává změny v odrazivosti tím, jak vodní pára kondenzuje na zrcátku. Vnitřek bloku tvoří ventilátor, senzor rosného bodu, teplotní čidlo a infračervený teploměr. Senzor rosného bodu měří rosnou teplotu vzduchu. Teplota je změřena v momentě, kdy nastane kondenzace. Infračervený teploměr měří teplotu vzorku. Ventilátor slouží k tomu, aby urychlil vyrovnávání potenciálu. Tlak vodní páry ve vzduchu v čele komory je počítán jako tlak nasycené vodní páry při teplotě rosného bodu. (Operator's Manual: WP4C Dew Point PotentialMeter, 2016)



Obrázek 28: Příklad k měření potenciálu půdní vody WP4C (Operator's Manual: WP4C Dew Point Potential Meter, 2016)

V rámci diplomové práce byly připraveny 3 nasycené roztoky solí s rozdílnými hodnotami relativní vlhkosti nasycených vodních par. V destilované vodě byly rozpuštěny soli uhličitanu draselného ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), chloridu draselného (KCl) a síranu draselného ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Tabulka 4: Hodnoty relativní vlhkosti nasycených par roztoků solí (OMEGA Engineering)

Nasycené roztoky solí	Relativní vlhkost nasycených par [%]	
	20°C	25°C
$\text{K}_2\text{CO}_3$	43,16 ± 0,33	43,16 ± 0,39
KCl	85,11 ± 0,29	84,34 ± 0,26
$\text{K}_2\text{SO}_4$	97,59 ± 0,53	97,30 ± 0,45

Tyto roztoky byly postupně umístěny do exsikátoru spolu se vzorky substrátů zelených střech z jednotlivých segmentů a ponechány několik dní do ustálení stavu, kdy byla voda v půdě v rovnováze s vodní parou ve vzduchu. K urychlení nastolení rovnováhy byl do exsikátoru umístěn ventilátor.



Obrázek 10: Vzorky připravené k sycení vodními párami



Obrázek 11: Vzorky uložené v exsikátoru před počátkem experimentu

Po dosažení rovnovážného stavu byly vzorky umístěny do předem označených a zvážených hliníkových kalíšků, byla zvážena hmotnost substrátu v nich a poté byly zavíčkovány a zabaleny do folie k převozu z laboratoře na Fakultě stavební do laboratoře Univerzitního centra energeticky efektivních budov, kde se přístroj WP4C nachází.



Obrázek 12: Uchování vzorků připravených k měření



Obrázek 13: Vzorky připravené pro převoz na UCEEB

Vzorky v kalíscích musely být pokryt dno kalíšku a zaplnit maximálně polovinu objemu, aby nedošlo k poškození sensorového bloku.

Před každým měřením byl přístroj zkalibrován pomocí vytvořeného roztoku KCl s koncentrací 0,5 mol/kg o známém potenciálu. Kalibrace probíhala vždy za použití stejných materiálů kalíšků, ve kterých následně probíhalo měření potenciálu substrátů. Byly použity plastové i hliníkové kalíšky.

Vkládané vzorky musely být vždy chladnější než komora, aby nedošlo ke kondenzaci předčasně. Teplota vkládaných vzorků byla ověřena přístrojem.

Na konci měření se zobrazí hodnota potenciálu, která by se neměla od požadované hodnoty lišit o více než 0,05 MPa. Při odchylce se hodnota potenciálu opraví tlačítkem a kalibrace se spustí znovu.



Obrázek 14:  
Kalibrační roztok

Po kalibraci byly do přístroje postupně vkládány vzorky. Doba měření jednotlivých vzorků dosahovala v některých případech ke 40 minutám, jindy byly přístrojem změřeny během 10 minut. Po ukončení měření přístroj zobrazil hodnotu potenciálu. Maximální dosažitelná hodnota potenciálu přístrojem je -300 MPa. V rámci práce se naměřené hodnoty pohybovaly v rozmezí <-165; -128> MPa ( $K_2CO_3$ ), <-95; -33> (KCl), <-100; -26> ( $K_2SO_4$ ).

Po ukončení měření byly vzorky znovu zabaleny do folie, aby se zamezilo úniku vlhkosti, převezeny zpět na fakultu, uloženy do pece k vysušení při 60°C a po ustálení hmotnosti zváženy.

Změřené hmotnostní vlhkosti byly přepočteny na objemové. Spolu s příslušnými změřenými hodnotami potenciálu vody v půdě tyto údaje doplnily body suché oblasti retenční čáry.

Hodnota objemové hmotnosti substrátu byla převzata z charakteristik střešních substrátů výrobce.

### 6.7.3 Optimalizace parametrů van Genuchtenovy křivky

Body retenční křivky, získané z měření na pískovém tanku a přístrojem WP4C, byly proloženy matematickou funkcí pro retenční křivku podle van Genuchtena:

$$S_E = \frac{1}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad (5.1)$$

kde  $S_E$  je efektivní nasycenost,  $h$  je sací tlaková výška [L],  $\alpha$  [ $L^{-1}$ ],  $n$ ,  $m$  jsou optimalizační parametry (van Genuchten, M.T., 1980).



Parametry křivek byly získány metodou nejmenších čtverců. Z jednotlivých vzorků byla následně vybrána reprezentativní křivka pro každý ze segmentů. Získané parametry byly dále použity pro modelování v programu Hydrus1D a jsou uvedeny v tabulce 5.

## 6.8 Objemová vlhkost aktuální vs. objemová vlhkost naměřená

K ověření správnosti měření vlhkosti substrátu čidly TDR byla gravimetricky stanovena také hodnota aktuální vlhkosti  $\theta_a$ . Porušené půdní vzorky byly odebrány dne 16.11.2017 v čase mezi 14:00-15:00, z každého segmentu 3 vzorky. Ze záznamů vlhkosti čidly TDR byla získána objemová vlhkost odpovídající datu a času odběru vzorků. Hodnoty byly následně porovnány.

## 6.9 Jednorozměrná simulace vodního režimu segmentů zelených střech

Pro modelování proudění vody v substrátu byl použit program pro simulaci pohybu vody, tepla a rozpustných látek v jednorozměrném proměnlivě nasyceném médiu HYDRUS-1D. Program Hydrus numericky řeší Richardsovu rovnici. (Simunek, Saito, Sakai, & Van Genuchten, 2008)

Součástí vstupních údajů modelu jsou informace o okrajových a počátečních podmínkách, hydraulických charakteristikách materiálů, srážkách a meteorologických parametrech a podmínkách získaných z měření meteorologické stanice na střeše budovy UCEEB (maximální a minimální denní teploty, relativní vlhkost vzduchu, rychlost větru a sluneční osvit).

Simulace byla provedena v podzimním období od 19.10.2017 do 30.11.2017, tzn. pro 43 dní. Počátek simulací se odráží od stavu, kdy byla veškerá měřící zařízení (měření odtoků a vlhkostí substrátů pomocí TDR) finálně zkalibrována, aby bylo možné porovnat naměřené charakteristiky se simulacemi. Srážky jsou zadávány jako 5minutové úhrny a zadané denní meteorologické údaje jsou pro výpočet potenciální evapotranspirace z jednotlivých segmentů zpracovány modelem pomocí rovnice Penman-Montheitha.

Konstantní parametry hydraulických vlastností materiálu použité v modelu HYDRUS-1D jsou uvedeny v následující tabulce. První sloupec obsahuje nasycenou hydraulickou vodivost získanou z charakteristik substrátů výrobce. Druhý a třetí sloupec obsahuje objemovou vlhkost reziduální (v rámci zjednodušení je reziduální vlhkost  $\theta_r = 0$ ) a nasycenou ( $\theta_s$ ). Poslední dva sloupce obsahují parametry retenčních čar použitých substrátů dle van Genuchtena.

Tabulka 5: Hydraulické charakteristiky materiálů zadané do modelu HYDRUS-1D

Segment	$K_s$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$
	cm/den	[-]	[-]	[1/cm]	[-]
S1	8640.0	0	0,45	0.0078	1.3483
S2	8640.0	0	0,45	0.0142	1.3488
S3	8841.6	0	0,42	0.0108	1.4602
S4	8841.6	0	0,42	0.0086	1.4118

Pro výpočet byl zvolen model van Genuchten – Mualem. Ačkoliv se v případě simulací segmentu S2 a S3 jedná o duální prostředí, v rámci práce bylo uvažováno prostředí homogenní odpovídající naměřeným hydraulickým charakteristikám odebraných vzorků.

Proudění bylo simulováno bez uvážení působení kořenů vegetace vzhledem ke snaze zachovat rozumný rozsah diplomové práce. V modelu není uvažována hystereze. V modelu nebyly simulovány tepelné toky jednotlivých segmentů vzhledem rozsahu problematiky, která by si zasloužila samostatnou obsáhlou kapitolu.

Horní hranice simulací jsou nastaveny na atmosférické okrajové podmínky s možností zadržení vody na povrchu média. Spodní hranice je definována výronovou plochou, přes kterou začne voda proudit v momentě plného nasycení ( $h=0$ ).

V grafickém editoru byly definovány počáteční podmínky určené tlakovými výškami ve všech bodech. Hodnota tlakové výšky na horní hranici byla pro simulaci segmentů S1 a S4 nastavena na -355 cm a na spodní hranici, vzhledem k tloušťce substrátu, na -349 cm. Hodnota tlakové výšky na horní hranici pro simulaci segmentů S2 a S3 byla nastavena rovněž na hodnotu tlakové výšky -355 cm, zatímco na spodní hranici byla ze stejného důvodu nastavena na -351 cm tlakové výšky.

Výsledkem jsou hodnoty kumulativního objemového toku přes horní a spodní hranici z každého ze segmentů.

## 6.10 Evapotranspirace

Pro numerický výpočet potenciální evapotranspirace byla použita rovnice Penmana-Monteitha (Penman, 1948).

Referenční hodnota potenciální evapotranspirace je určena na základě měření klimatických dat (relativní vlhkosti vzduchu, teploty vzduchu, rychlosti větru a solární



radiace). Hodnoty trvání slunečního svitu v denním kroku v roce 2017 byly získány z volně dostupných historických dat z portálu ČHMÚ stanice Praha Ruzyně, která je svou lokací nejbližší z dostupných k místu experimentu ([www.portal.chmi.cz](http://www.portal.chmi.cz)).

Data jsou aktualizována 1x ročně.

Denní záznamy slunečního svitu pro první čtyři měsíce roku 2018 byly získány na základě emailové komunikace s Ing. Václavem Pokorným z Českého hydrometeorologického ústavu, jímž byla data pro účely této práce poskytnuta.

## 6.11 Chemická analýza

Dne 16.11. byly odebrány porušené půdní vzorky ze segmentů S1-S4 za účelem provedení chemické analýzy. Chemická analýza byla stanovena Ústavem technologie vody a prostředí VŠCHT.

Cílem požadovaných rozborů bylo získat informace o kvalitě 4 vodných výluhů vzorků půdního substrátu zelené střechy.

Výluhy byly provedeny v souladu s ČSN EN 12 457 – 4 „Charakterizace odpadů – Vyluhování – Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů – Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 10 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním).

K analýzám byl použit původní vzorek, příslušné sušiny vzorků jsou uvedeny v tabulce 1.

V tabulce jsou uvedeny hodnoty ukazatelů ve vodných výluzích původních vzorků připravených dle výše uvedené normy.

V pevném vzorku půdních substrátů byl stanoven pouze obsah organického uhlíku (TOC), celkový dusík a celkový fosfor. Tyto ukazatele byly stanoveny ve vysušeném vzorku, výsledek je tudíž uveden v mg a je vztažen na sušinu vzorku. (Protokol o zkoušce: Ústav technologie vody a prostředí VŠCHT, 2017)

Tabulka 6: Protokol o zkoušce: Ústav technologie vody a prostředí VŠCHT, (2017)

VZOREK		S1	S2	S3	S4
ukazatel	jednotka				
hodnota pH	-	8,2	8,2	8,0	8,0
konduktivita	mS/m	14,0	14,5	16,1	17,4
chloridy	mg/l	0,56	1,56	1,49	0,82
amonné ionty	mg/l	1,63	1,72	1,99	2,17
dušitany	mg/l	0,022	0,027	0,024	0,027
dusičnany	mg/l	1,62	2,52	3,15	4,14
sírany	mg/l	9,57	8,29	27,0	32,6
fosforečnany	mg/l	1,28	1,88	1,81	2,00
CHSK-Cr	mg/l	100	41,6	46,8	12,7
DOC	mg/l	7,53	10,05	13,2	13,2
železo celkové	mg/l	0,041	0,089	0,042	0,056
mangan	mg/l	0,029	0,016	0,018	0,014
Nikl	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Zinek	mg/l	0,021	0,013	0,016	0,015
fenoly	mg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
kadmium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
olovo	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
C10-C40	µg/l	< 250	< 250	< 250	< 250
solid TOC	% C	0,98	1,14	0,76	0,62
celkový dusík	mg/kg	900	600	600	700
celkový fosfor	mg/kg	591	542	520	648
sušina	%	70,4	69,6	60,0	59,9

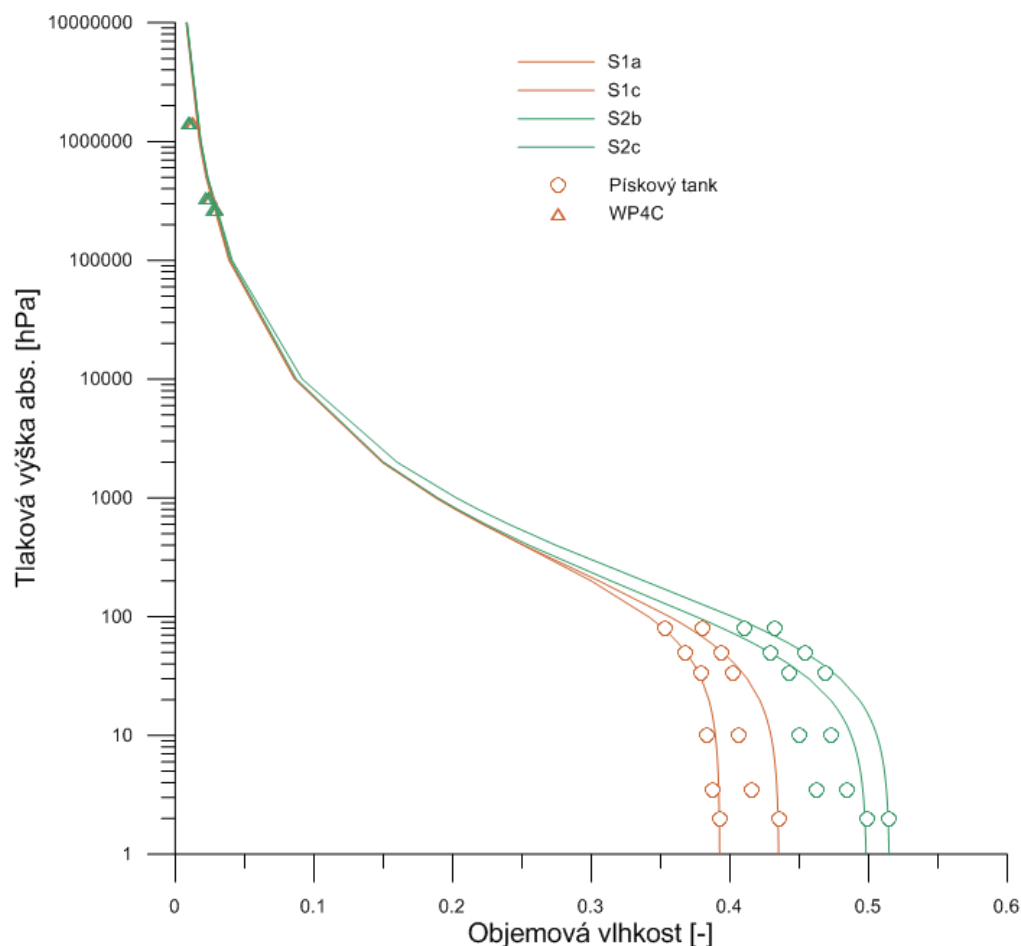
## 7 Výsledky

V následující kapitole jsou shrnuty výsledky laboratorních měření retenčních čar, výsledky půlročního pozorování a porovnání měřených dat s matematickými simulacemi.

### 7.1 Retenční křivky jednotlivých segmentů

Změřené body retenčních čar byly proloženy matematickou funkcí pro retenční křivku podle van Genuchtena. Celkem byly změřeny dvě kompletní retenční křivky z každého segmentu. Pro simulace vodního režimu každého ze segmentů byla zvolena jen jedna retenční křivka, vždy ta, která lépe prokládala naměřené body. V případě segmentů S1 a S2 se jedná o křivky označené S1a a S2b viz. graf 1.

Průběhy retenčních čar demonstrují fakt, že vzorky ze segmentů S2 a S3 byly odebrány včetně rozhodníkových koberců, jejichž samostatné parametry nebyly dále nijak zkoumány.

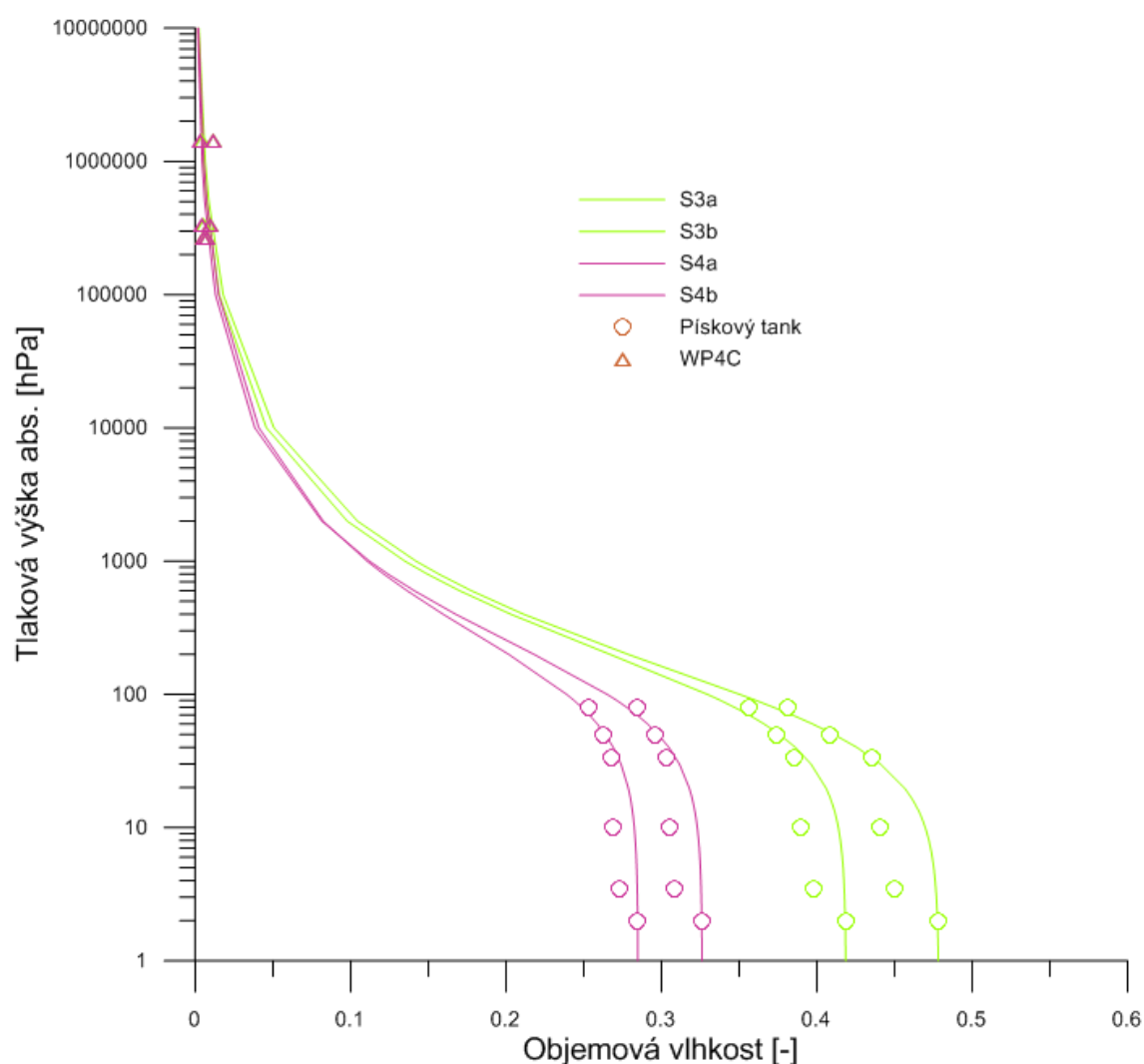


Graf 1: Retenční křivky substrátů pro segmenty S1 a S2

Průměrná hodnota vlhkosti při plném nasycení substrátu v segmentu S1 je 0,41 zatímco průměrná hodnota vlhkosti substrátu při plném nasycení v segmentu S2 dosahuje hodnoty 0,51.

V obou případech se jedná o substrát ACRE. V prvním případě dosahuje mocnost substrátu 6 cm a ve druhém 4 cm. Ve druhém případě se navíc nachází 2 cm rozchodníkového koberce, kde však převládá mocnost vegetace nad mocností média, na kterém je rozchodníkový koberec předpěstován. Retenční schopnost segmentu S2 s rozchodníkovým kobercem je o 10 % vyšší v porovnání se segmentem S1.

V případě segmentů S3 a S4 byly pro účely modelování zvoleny reprezentativní křivky označené S3a a S4a viz. graf 2.



Graf 2: Retenční křivky substrátů pro segmenty S3 a S4

Průměrná hodnota vlhkosti při plném nasycení substrátu v segmentu S3 je 0,45 zatímco průměrná hodnota vlhkosti substrátu při plném nasycení v segmentu S4 dosahuje hodnoty 0,31. V obou případech se jedná o substrát BB Com. Substrát s rozchodníkovým kobercem, stejně jako v předchozím případě, vykazuje vyšší retenční schopnost celkem o 14 % oproti retenční schopnosti substrátu v segmentu S4.

Technické listy substrátů použitých v experimentu uvádějí hodnotu maximální vodní kapacity. Substrát ACRE při maximální vodní kapacitě (MVK) obsahuje vodu v rozmezí hodnot 30 – 45 %, naměřená hodnota objemové vlhkosti při nasycení je o 4 % nižší (při uvážení MVK 45 %). Substrát BB Com při MVK dosahuje 42 % objemu vody, což je o 11 % více, že bylo naměřeno laboratorně na vzorcích ze segmentu S4.

## 7.2 Objemová vlhkost aktuální vs. objemová vlhkost naměřená

K porovnání naměřené vlhkosti substrátu čidly TDR byla gravimetricky stanovena aktuální objemová vlhkost. Z výsledků porovnání vyplývá, že měřená vlhkost je oproti té aktuální nadhodnocena v každém ze segmentů. Získaná hodnota rozdílu vlhkostí každého segmentu byla použita k úpravě měřených dat. Měřené řady vlhkostí byly posunuty o hodnotu rozdílu mezi vlhkostí měřenou a aktuální. Průměrné hodnoty měřených vlhkostí jsou uvedeny níže, viz. tabulka 7.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty vlhkostí a hodnota korekce

16.11.2017	w	$\theta_a$	$\theta_{TDR}$	$\Delta\theta$
Segment	[-]	[-]	[-]	[-]
S1	0.1290	0.0611	0.0213	0.0398
S2	0.1639	0.0777	0.0255	0.0522
S3	0.3958	0.2375	0.0517	0.1858
S4	0.3782	0.2269	0.0537	0.1732

## 7.3 Vodní režim segmentů zelených střech

Celkový srážkový úhrn od založení experimentu do konce sledovaného období (1.9.2017-20.4.2018) dosáhl na hodnotu 182,6 mm. V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty měsíčních srážkových úhrnů a maximální srážkové úhrny v daném měsíci.

Tabulka 8: Srážkové úhrny měřené od založení experimentu do konce sledovaného období

	měsíční úhrn	maximální denní úhrn	datum
měsíce 2017/2018	[mm]	[mm]	[mm]
Září	30.0	9.9	1.9.
Říjen	52.4	11.5	29.10.
Listopad	22.0	7.0	12.11.
prosinec	17.5	9.3	28.12.
Leden	19.6	9.9	3.1.
Únor	3.0	1.9	16.2.
březen	26.0	8.5	12.3.
Duben	12.1	11.6	16.4.



Ve sledovaném období (19.10.2017-20.4.2018) byl zaznamenán celkový úhrn srážek 128,9 mm.

Po kalibraci zařízení měřícího odtok bylo zjištěno, že segment S3 nezaznamenává množství odtékající vody správně. Z tohoto důvodu nebyl zahrnut do analýz naměřených dat.

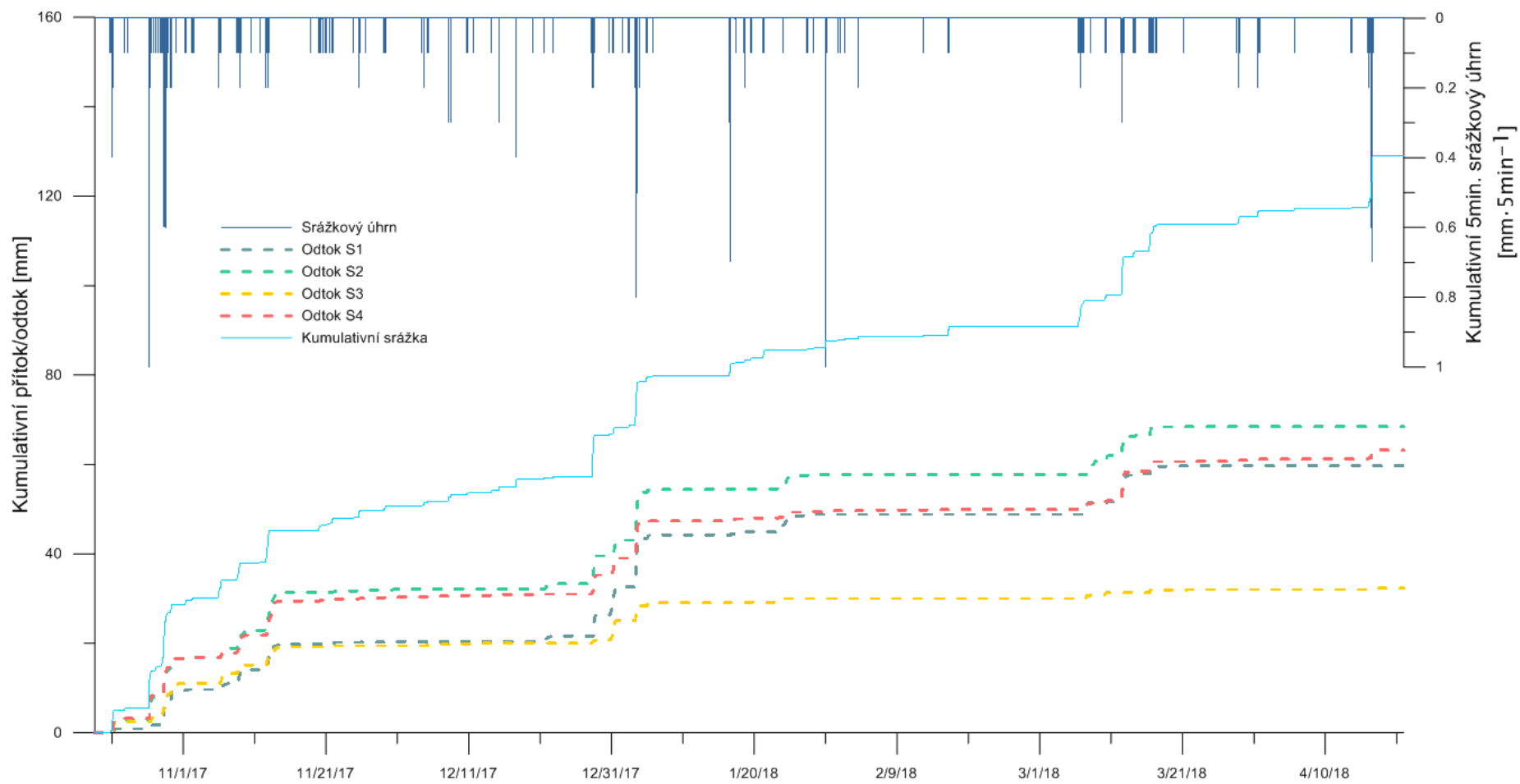
Na následujících stránkách jsou zobrazeny grafy, na nichž jsou vykresleny sledované veličiny. Graf 3 porovnává naměřené hodnoty odtoku ze segmentů zelených střech v závislosti na srážce. Z grafu lze vyčíst, že množství vody odtékající z jednotlivých segmentů je téměř shodné. Ze segmentu S1 celkem odteklo 59,7 mm, zatímco ze segmentu S2 odteklo celkem 68,5 mm, což je o 8,8 mm více. Ze segmentu S4 odteklo na konci sledovaného období 63, mm.

**Tabulka 9: Hodnoty odtokových součinitelů**

	[-]
S1	0.463
S2	0.531
S4	0.490

Tabulka 9 demonstruje odtokové součinitele jednotlivých segmentů stanovené pro sledované období. Z tabulky je patrné, že ze segmentu S2 odteklo nejvíce vody, oproti tomu odtokový součinitel segmentu S1 je o 6,8 % nižší. Ze segmentu S4 odteklo ve sledovaném období 49 % srážek.





Graf 3: Naměřené odtoky ze segmentů zelených střech v porovnání se srážkovými úhrny



Graf 4 na následující stránce porovnává závislost vlhkosti substrátů na srážkových úhrnech a teplotě v substrátech. Lze si povšimnout, že při teplotách v substrátech nižších než 0°C nelze zaznamenávat vlhkost substrátu.

Hodnoty vlhkosti jsou již upraveny korekcí za pomoci gravimetrického zjištění aktuální vlhkosti.

Vzhledem k nepravděpodobnému průběhu záznamů vlhkosti čidla TDR1 ze segmentu S1, bylo toto čidlo z analýz vyloučeno.

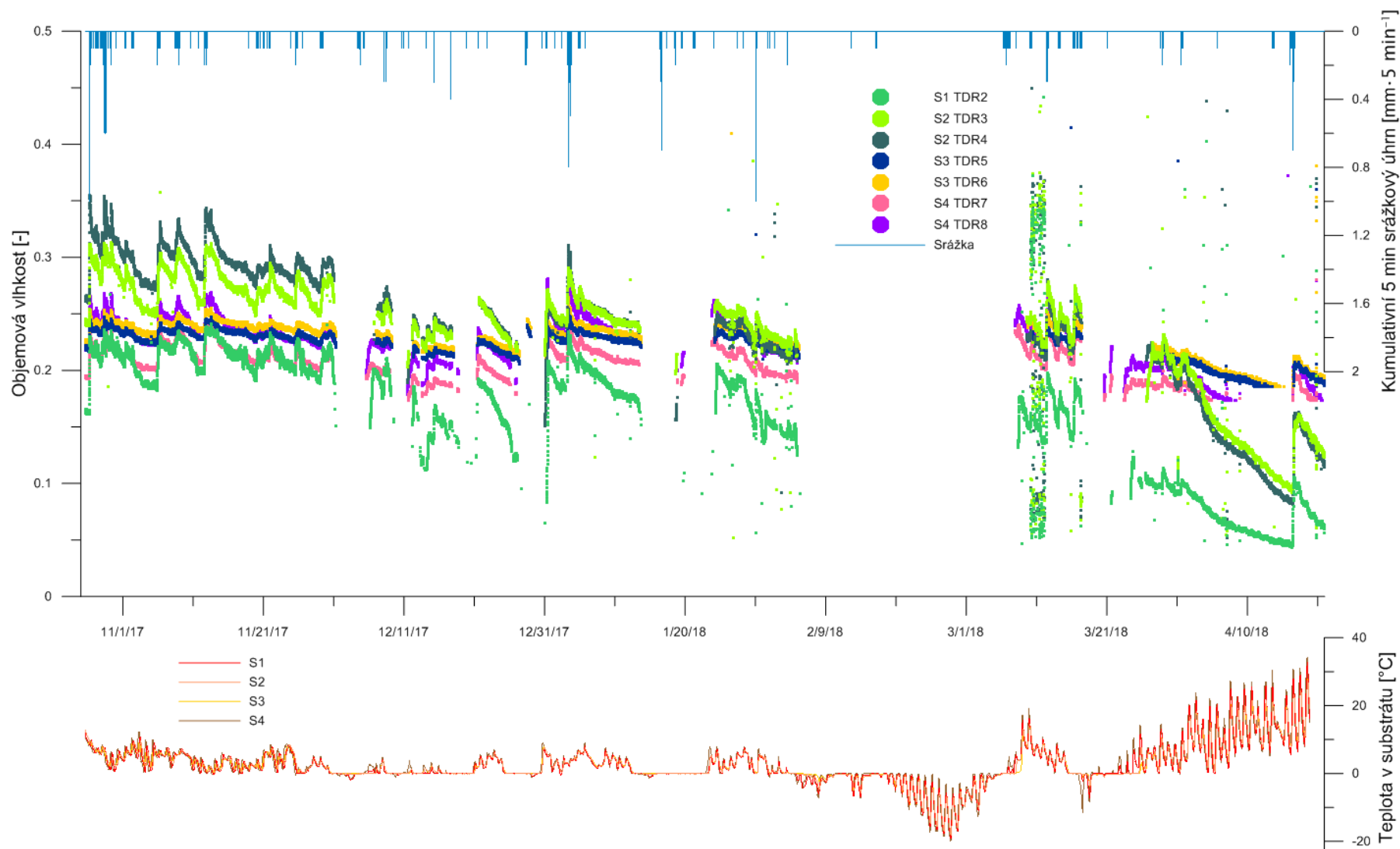
Ze záznamů je vidět, že průběh vlhkostí v jednotlivých segmentech kolísá v závislosti na srážkových úhrnech a období bez srážek, kdy dochází k výparu. Z grafu je patrné, že segment S2 obsahuje nejvíce vody, což ale odporuje předchozím analýzám, kdy průběh odtoku ze segmentu S2 byl oproti ostatním segmentům, nejvyšší. Vysoká vlhkost segmentu S2 odpovídá nejvyšší naměřené hodnotě nasycené vlhkostí substrátu v segmentu S2 (graf 1).

Rozpor je detailněji zobrazen v grafu 5, kde je vidět, že ačkoliv ze segmentu S2 odtéká více vody, než ze segmentu S1, je jeho vlhkost oproti vlhkosti substrátu v segmentu S1, vyšší. Celkově nižší hodnoty vlhkosti byly měřeny v segmentech S3 a S4. Tento fakt je podložen nižší schopností retence použitého substrátu vyplývající z grafu 2.

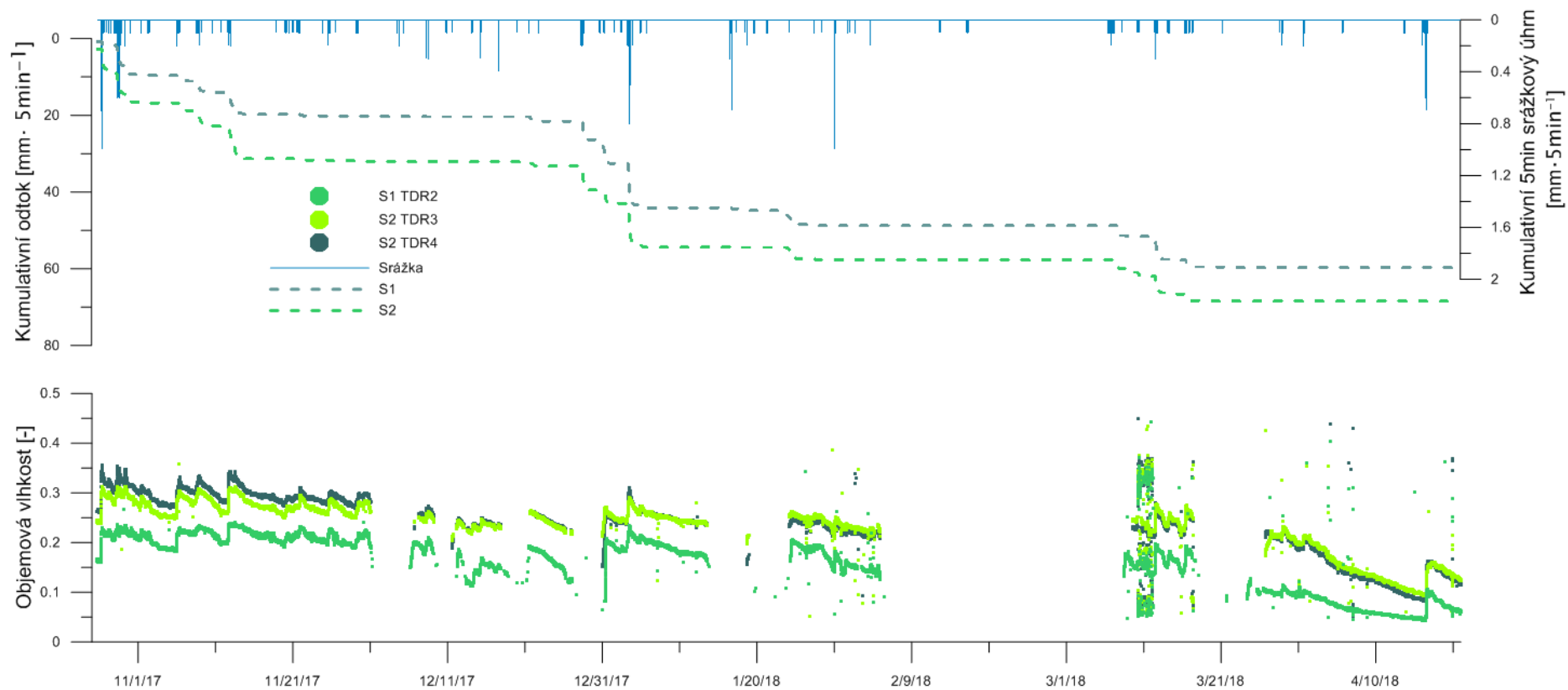
Segmenty, na kterých jsou uloženy rozchodníkové koberce, vykazují po infiltraci srážky vyšší vlhkost, kterou si déle drží. Vlhkost klesá postupně a voda ze segmentu odtéká pomaleji. Vzhledem k tomu, že při stejné srážce odteče ze segmentu S2 více vody při zachování vyšší vlhkosti substrátu ve srovnání se segmenty S1 a S4, lze usuzovat, že husté pokrytí vegetací zmírňuje výpar z kořenové zóny segmentu S3.

Odtok ze segmentů bez rozchodníkových koberců (S1 a S4) odpovídá předpokladu, že vzhledem k hydraulickým charakteristikám substrátů bude z jednoho ze segmentů odtékat méně vody. V tomto případě se jedná o segment S1, jehož nasycená objemová vlhkost je o 10 % vyšší oproti nasycené objemové vlhkosti segmentu S4.

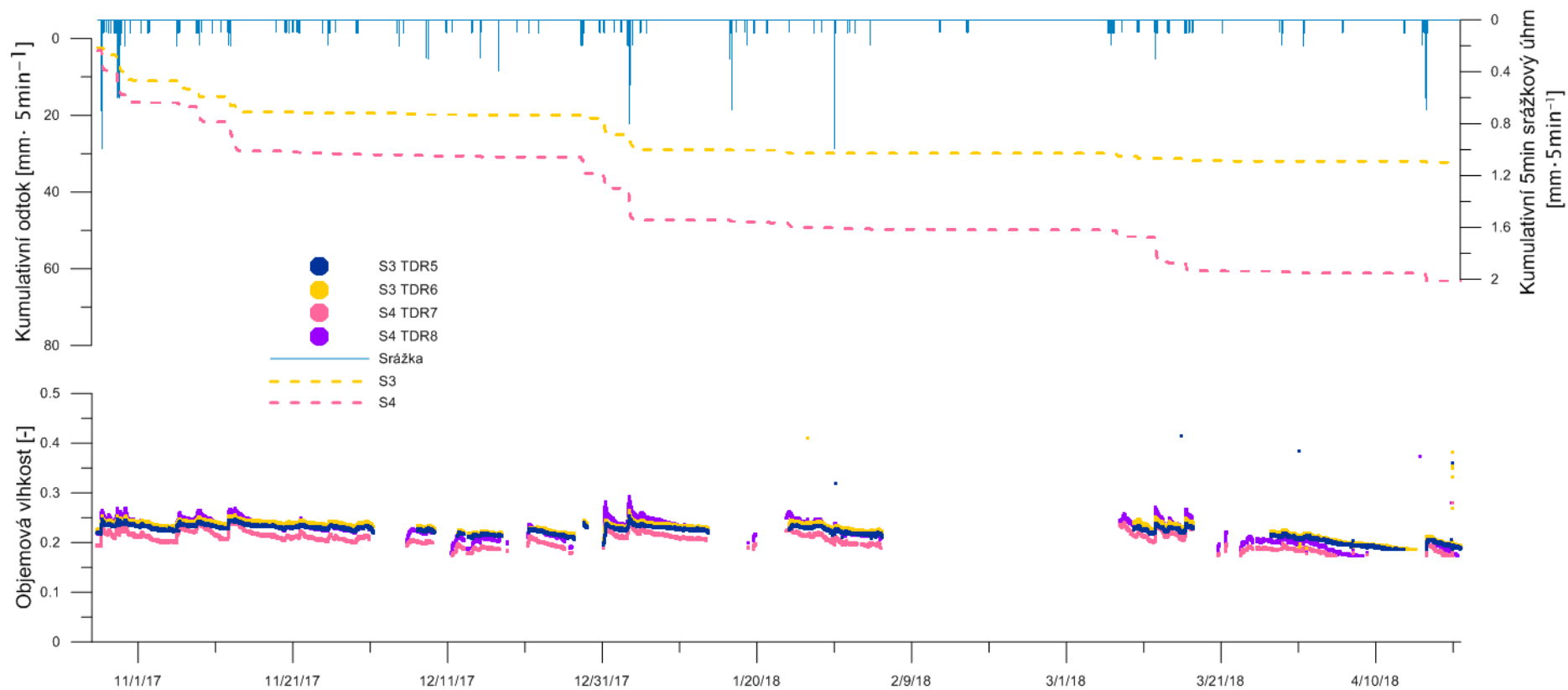
Z grafu 6 lze vyčíst, kterým směrem ve směru spádu jednotlivých segmentů jsou uložena čidla TDR. Čidla TDR označena sudými čísly se nacházejí dále od žlabu a je patrné, že s rostoucím gradientem, daným spádem segmentů, jejich vlhkost klesá. Tento trend je po většinu sledovaného období zachován. Výjimku tvoří segment S2.



Graf 4: Průběh vlhkostí v jednotlivých segmentech zelených střech v závislosti na teplotě a srážkovém úhrnu.



Graf 5: Průběh vlhkostí v segmentu S1 a S2 v závislosti na srážkovém úhrnu a odtoku vody ze segmentu



Graf 6: Průběh vlhkosti v segmentu S3 a S4 v závislosti na srážkovém úhrnu a odtoku vody ze segmentu

### 7.3.1 Teplotní režim segmentů zelených střech a evapotranspirace

V rámci analýzy teplotního režimu zelené střechy byly porovnávány hodnoty teplot v substrátech jednotlivých segmentů, 2 m nad úrovní stávající zelené střechy, kde je experiment založen a jako referenční plocha k porovnání slouží betonová dlažba, v jejíž úrovni je také uloženo teplotní čidlo.

Tabulka 10: Průměrné měsíční teploty [°C]

měsíce 2017/2018	dlažba	S1	S2	S3	S4	2 m
září	14.7	12.3	12.4	12.4	12.6	12.5
říjen	9.5	8.4	8.6	8.4	8.4	10.8
listopad	4.0	3.6	3.8	3.8	3.7	4.5
prosinec	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	1.6
leden	2.5	2.2	2.3	2.4	2.3	3.0
únor	-2.5	-2.9	-2.7	-2.6	-2.7	-2.5
březen	3.4	1.3	1.1	0.9	1.6	1.7
duben	16.9	12.6	12.0	12.0	12.7	12.8

V tabulce 10 jsou shrnuty průměrné hodnoty teplot od počátku září 2017 do druhé poloviny měsíce dubna 2018. Výsledky poukazují na to, že se únorové teploty roku 2018 pohybovaly spíše pod nulou. Nejteplejším měsícem sledovaného období z roku 2017 bylo září. Ve sledovaném období v roce 2018 bylo nejtepleji v dubnu. Z tohoto faktu lze usuzovat, že sledované období minulo příhodnou sezónou pro rozvoj vegetace.

Tabulka 11: Maximální měsíční teploty [°C]

měsíce 2017/2018	dlažba	S1	S2	S3	S4	2 m
září	33.8	22.6	19.3	28.6	24.9	15.5
říjen	21.6	15.8	13.9	13.9	16.7	16.1
listopad	15.2	10.8	9.5	9.3	12.4	9.2
prosinec	11.2	7.0	7.6	7.9	9.2	8.5
leden	11.7	8.0	7.6	7.5	9.0	7.4
únor	8.8	4.9	5.2	5.1	5.6	4.0
březen	29.4	16.4	14.4	13.8	19.3	10.8
duben	48.3	32.7	27.2	27.7	34.3	19.7

Tabulka 11 zobrazuje maximální měsíční teploty. Nejvyšších hodnot dosahuje měření v úrovni referenční plochy – betonové dlažby. Naopak nejnižší hodnoty jsou zaznamenány ve 2 m nad úrovní zelené střechy. Tyto údaje potvrzují fakt, že zelená střecha má ochlazovací účinky. V teplejších dnech je patrný trend nižší teploty substrátu v segmentech pokrytých z velké části vegetací (S2 a S3) oproti segmentům s plochou téměř nezakrytou vegetací.

Tabulka 12: Minimální měsíční teploty [°C]

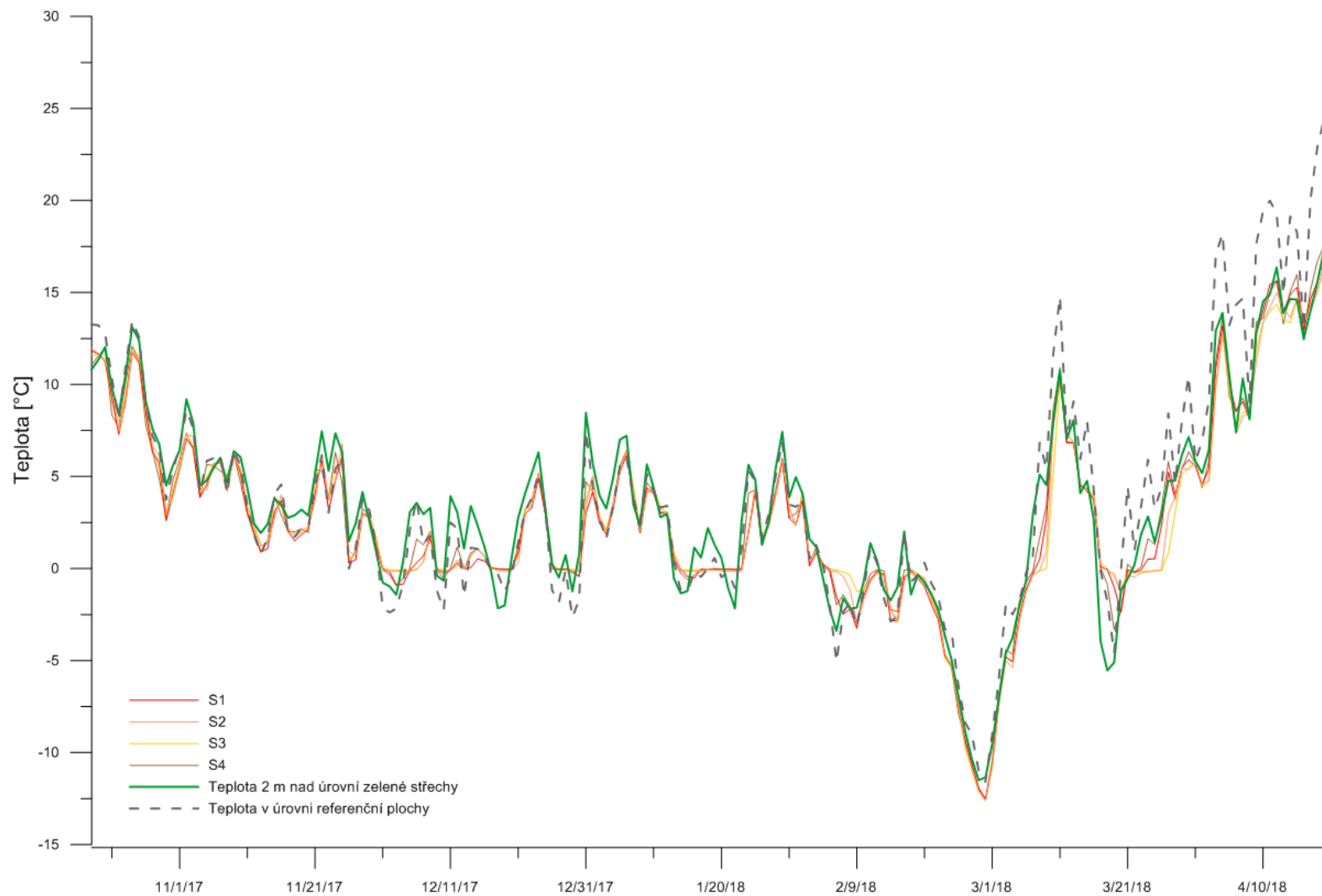
měsíce 2017/2018	dlažba	S1	S2	S3	S4	2 m
září	2.3	3.6	6.1	6.0	4.0	10.2
říjen	0.1	0.5	1.8	1.9	0.8	4.5
listopad	-1.8	-0.5	0.1	0.1	-0.7	0.9
prosinec	-7.3	-2.0	-0.3	-0.1	-2.0	-2.2
leden	-2.9	-1.1	-0.3	-0.1	-1.4	-2.2
únor	-20.8	-19.1	-18.3	-18.8	-19.9	-11.5
březen	-19.7	-17.0	-16.3	-16.3	-17.2	-9.5
duben	-0.9	-0.1	0.6	0.5	-0.2	5.2

V tabulce 12 si lze všimnout, že již v říjnu roku 2017 se teploty pohybovaly kolem nuly a extrémní hodnoty mrazu byly naměřeny v měsíci únor. Teploty klesající pod bod mrazu se příležitostně vyskytly i v měsíci dubnu.

Z naměřených teplotních dat je zaznamenatelný trend ochlazování prostředí zelenou střechou v průběhu teplých dní, zatímco při nižších teplotách a teplotách pod bodem mrazu je okolní vzduchu ve 2 m nad úrovní zelené střechy někdy i o 10°C teplejší ve srovnání s referenční plochou.

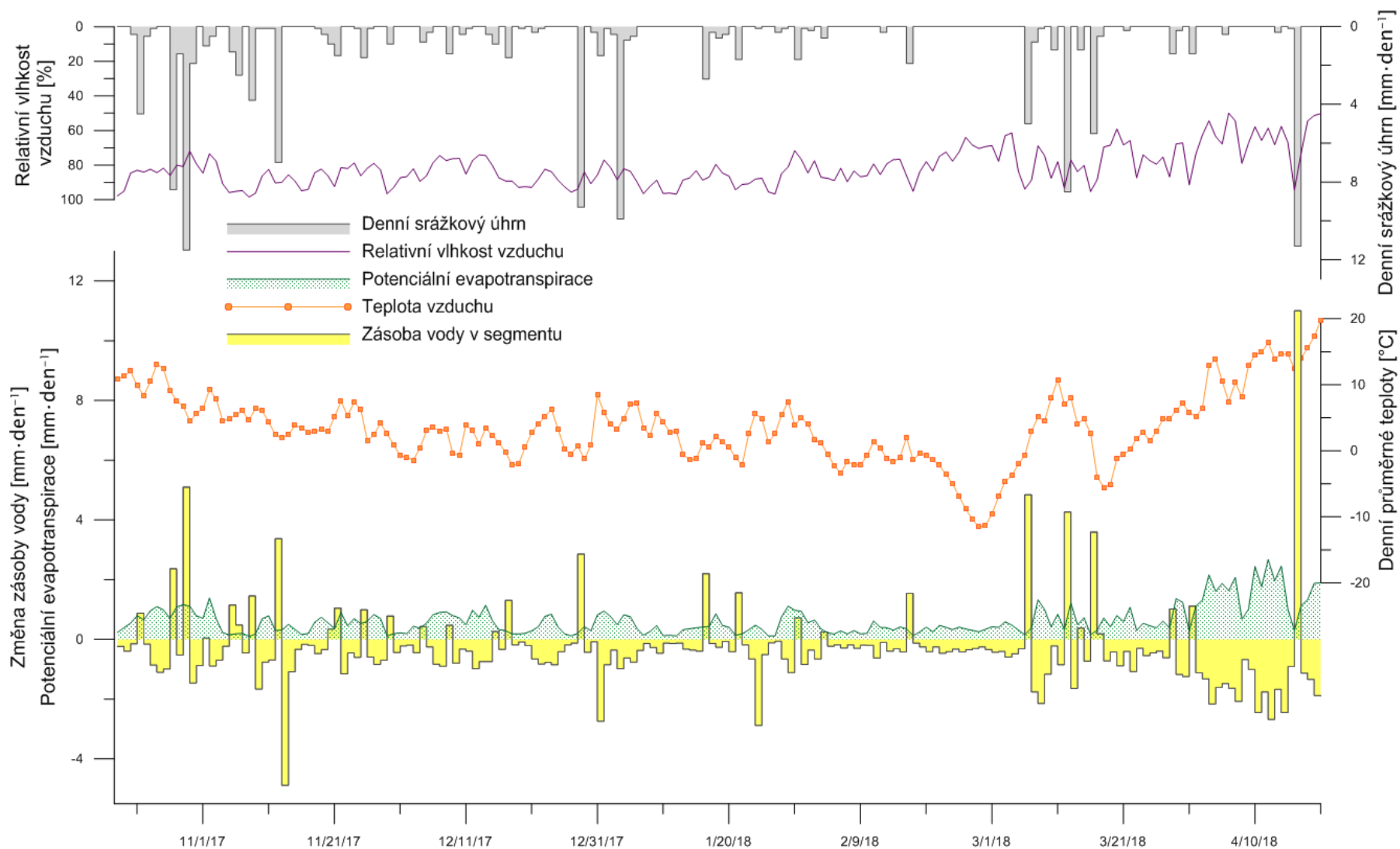
Trend ochlazování prostředí zelenou střechou při vysokých teplotách a naopak oteplování prostředí v období s nízkými teplotami je patrný i z grafu 7.

Graf 8 zobrazuje míru potenciální evapotranspirace vypočtené metodou FAO na základě naměřených meteorologických dat. V grafu je vidět, že při teplotách kolem bodu mrazu, nebo nižších, k evapotranspiraci nedochází. Dále je v grafu vidět že se srážkovými událostmi a vyšší relativní vlhkostí vzduchu míra evapotranspirace klesá. Kromě evapotranspirace a jiných veličin je v grafu vyznačena také změna zásoby vody v segmentu. Vynesená data odpovídají segmentu S2, který je vážený. Ze záznamů úbytku váhy mimo období, kdy prší lze určit míru aktuální evapotranspirace. V práci však tato data nebyla analyzována. K výpočtům míry potenciální evapotranspirace posloužil vztah Penman-Monteitha.



**Graf 7: Porovnání teplot naměřených v substrátech segmentů a teploty v úrovni betonové dlažby a 2 m nad úrovní zelené střechy v období od 26.10.2017 do 20.4.2018**

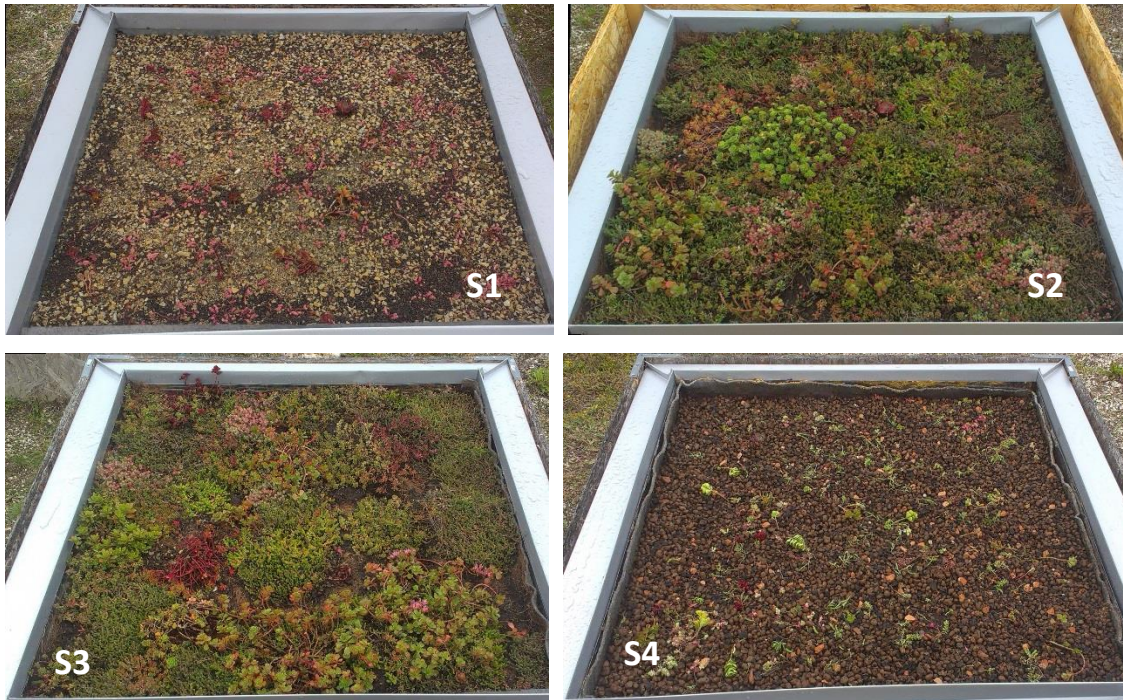




Graf 8: Závislost míry vypočtené evapotranspirace metodou FAO na meteorologických veličinách měřených meteostanicí v místě experimentu

## 7.4 Vegetace

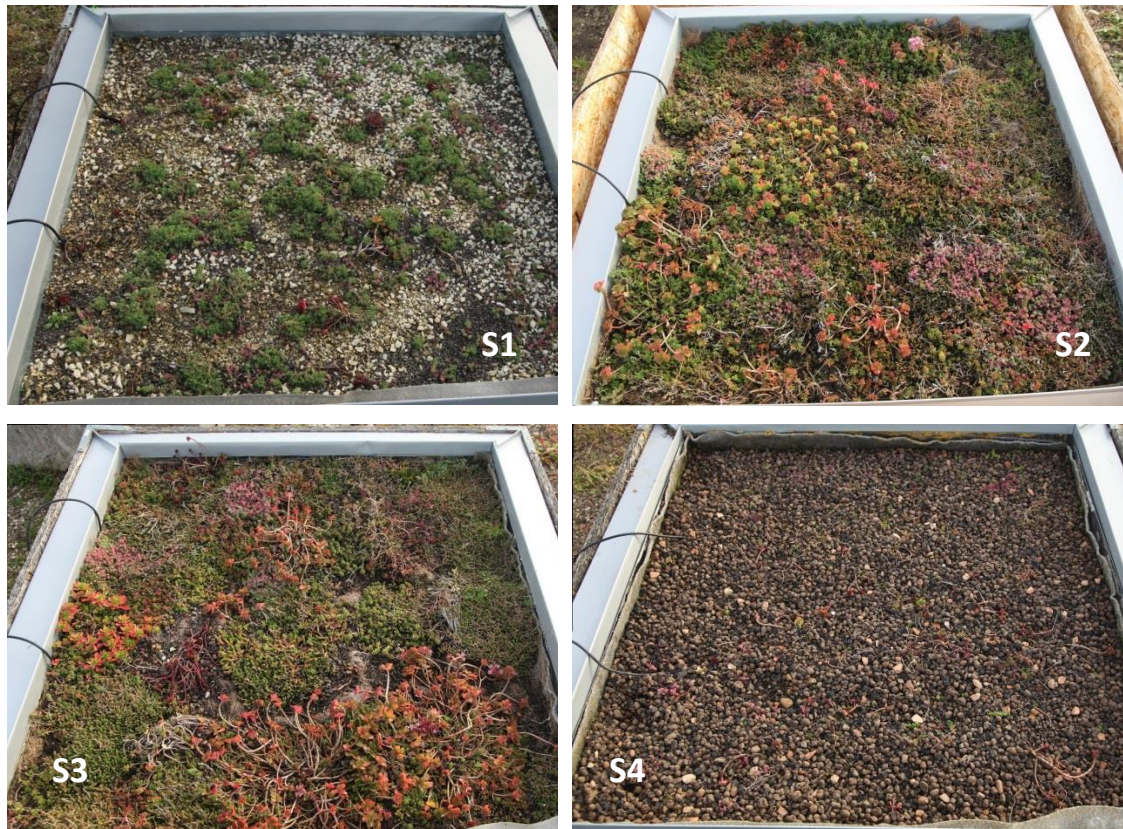
Vzhledem k termínu založení experimentu (konec léta 2017) a průběhu nízkých teplot ke konci roku se vegetace jednotlivých segmentů nestihla řádně zapojit.



Obrázek 34: Vývoj vegetace, záznam ze dne 13.9.2017

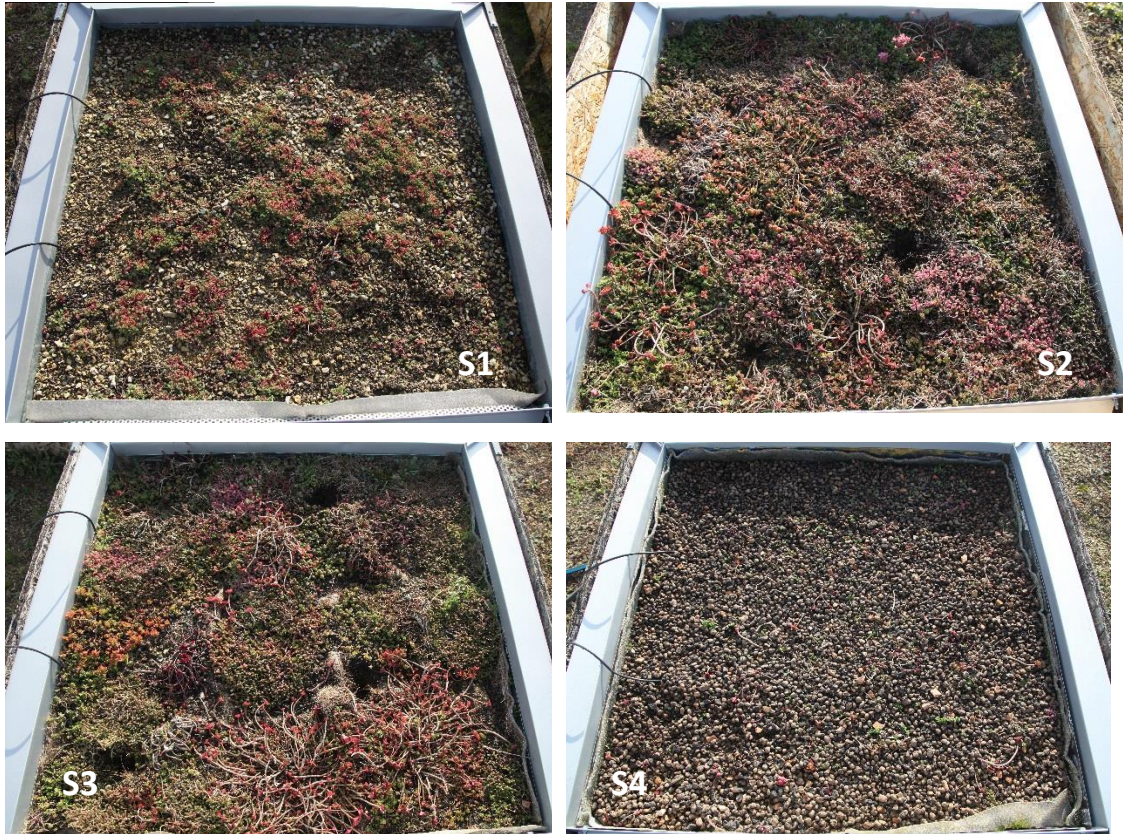
Na obrázku 34 ze dne 13.9.2017 je vidět poměrně zdárný stav vegetace vzrostlých předpěstovaných rozchodníkových koberců oproti rozchodníkovým řízkům, kterým zapojení trvá déle.

Stav vegetace se v průběhu jednoho měsíce změnil. Rozchodníkové řízky se zdárně ujaly na segmentu S1 zatímco rozchodníkovým řízkům segmentu S4 se nedařilo zapojit, ačkoliv pár ujatých jedinců bylo možné na segmentu dohledat. Vegetace rozchodníkových koberců reagovala na nižší teploty a úbytek solárního osvětlení zbarvením listů do teplých tónů viz. obrázek 35.



Obrázek 35: Vývoj vegetace, záznam ze dne 12.10.2017

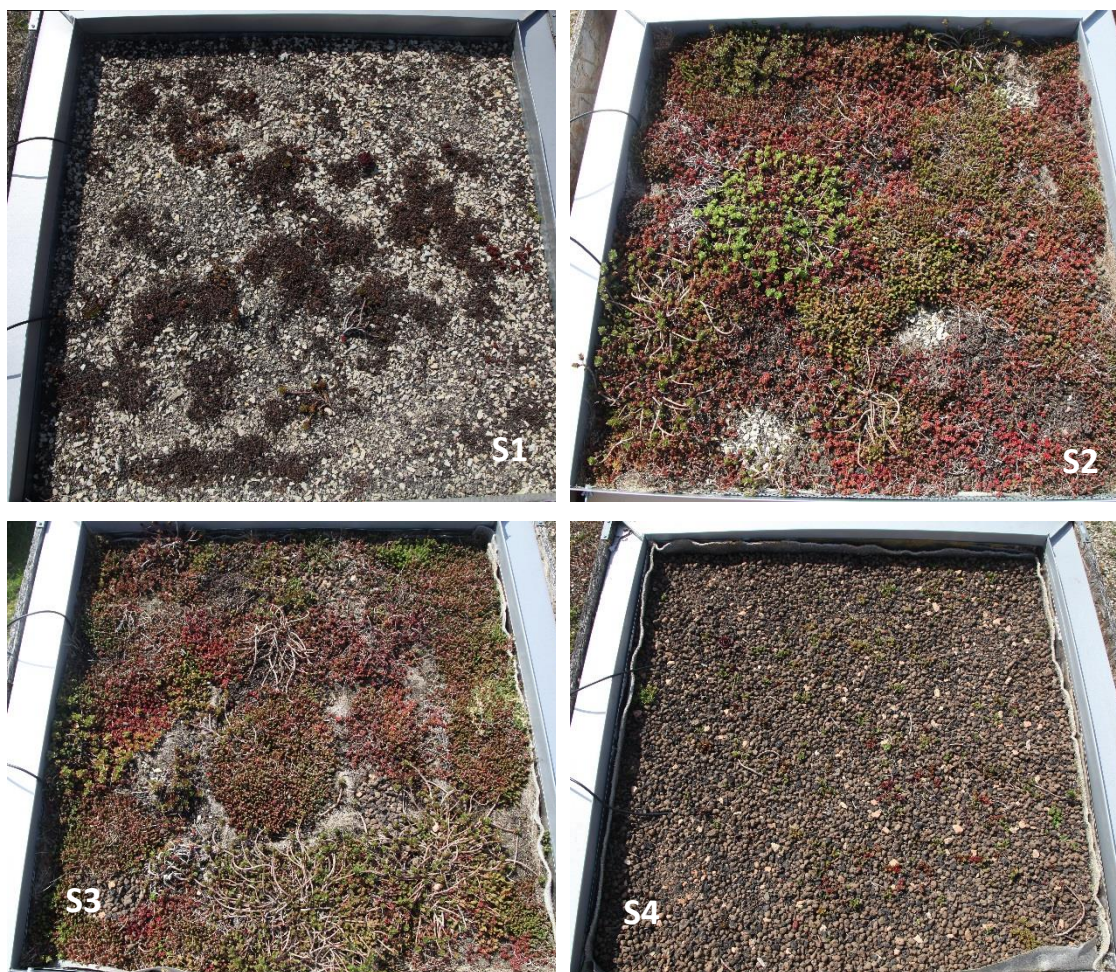
Záznam vývoje vegetace z listopadu 2017 je podobný záznamu z jara 2018. Na podzimním snímku je vidět, že se na segmentu S4 stále neujala téměř žádná zeleň.



Obrázek 36: Vývoj vegetace, záznam ze dne 14.11.2017

Záznamy růstu vegetace byly v zimním období (prosinec 2017 – březen 2018) omezeny.

Snímky z dubna roku 2018 demonstrují nepatrně se zlepšující stav vegetace segmentů S2 – S4, zatímco stav vegetace segmentu S1 se výrazně zhoršil.

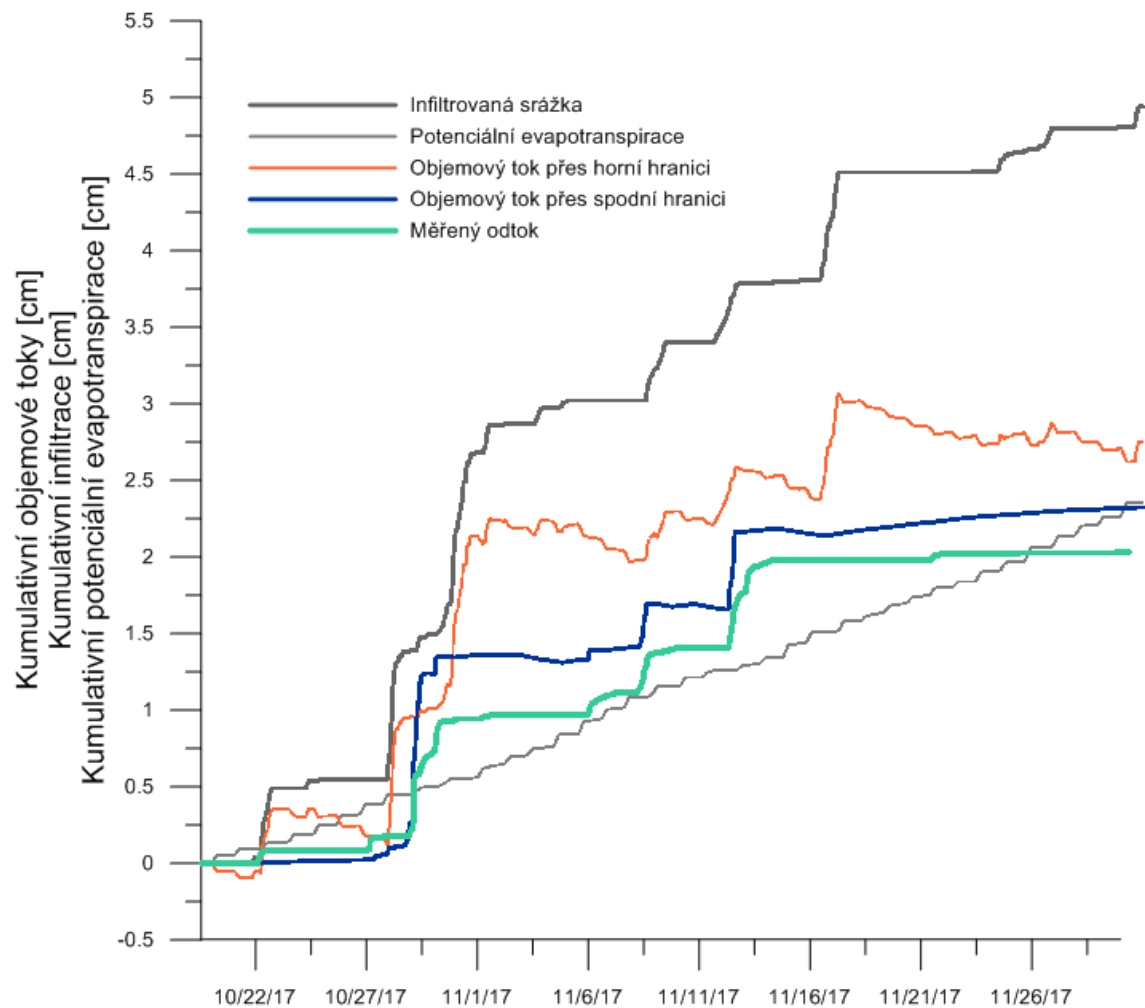


Obrázek 37: Vývoj vegetace, záznam ze dne 20.04.2018

## 7.1 Jednorozměrná simulace

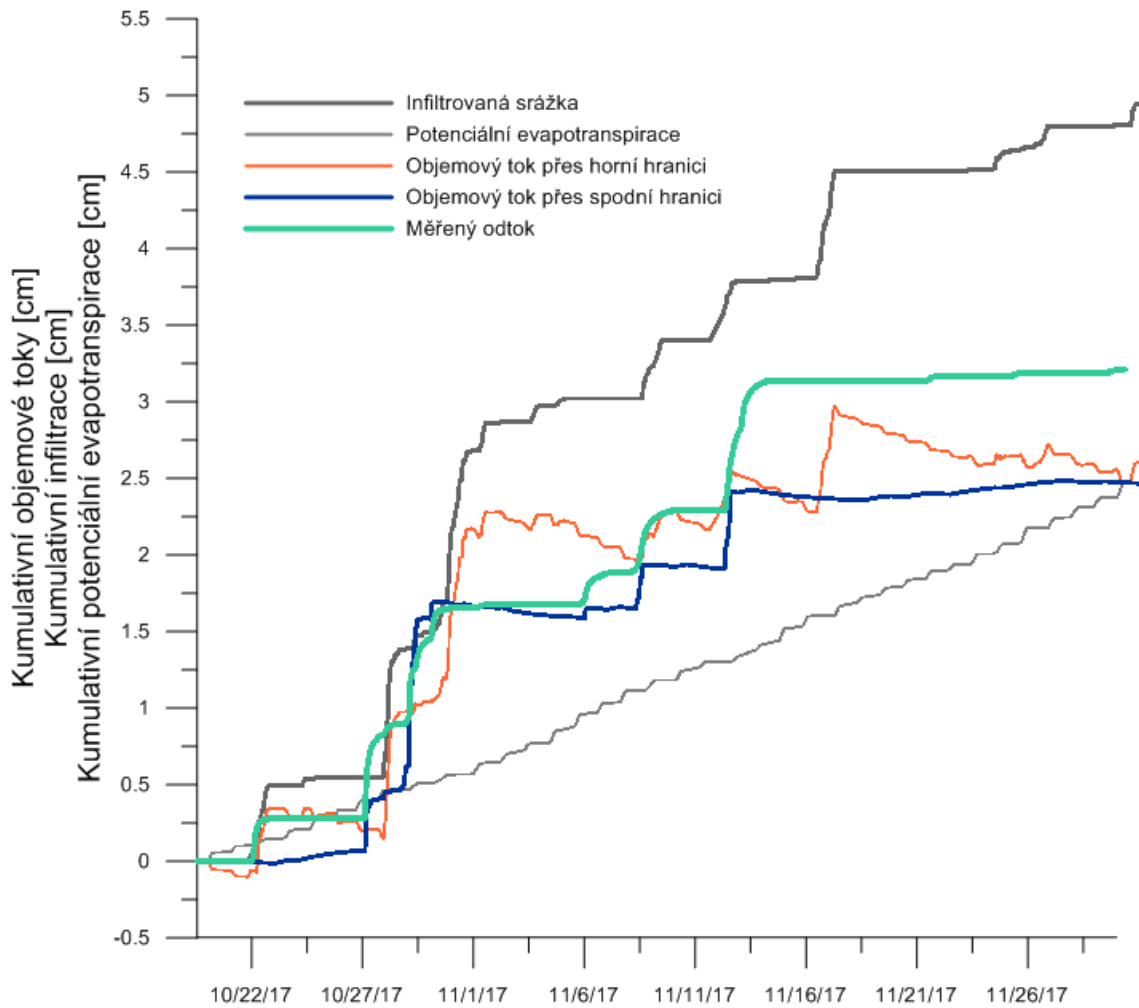
Do modelu byly zadány 5minutové srážkové úhrny z období od 19.10.do 30.11.2017, kdy byla simulace po 43 dnech ukončena. Celkový srážkový úhrn simulovaného období činí 50,7 mm. Výstupem simulace jsou kumulativní objemové toky přes horní a spodní hranici, míra evapotranspirace a srážka přepočtená modelem na infiltrované množství vody. Kumulativní objemové toky přes spodní hranici byly porovnány s naměřenými odtoky ze segmentů zelených střech. Trend průběhu odtoků se ve všech případech kopíruje. Model však nadhodnocuje celkové množství odtékající vody ze segmentu S1 v porovnání s modelovým odtokem. Naopak v případě segmentu S2 a S4 jsou údaje naměřeného odtoku vyšší ve srovnání s modelovým odtokem.

Rozdíl infiltrace a modelem vypočtené evapotranspirace udává míru kumulativního objemového toku přes horní hranici. Tato podmínka je splněna u všech simulovaných případů.



**Graf 9: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S1 se simulací z modelu HYDRUS1D**

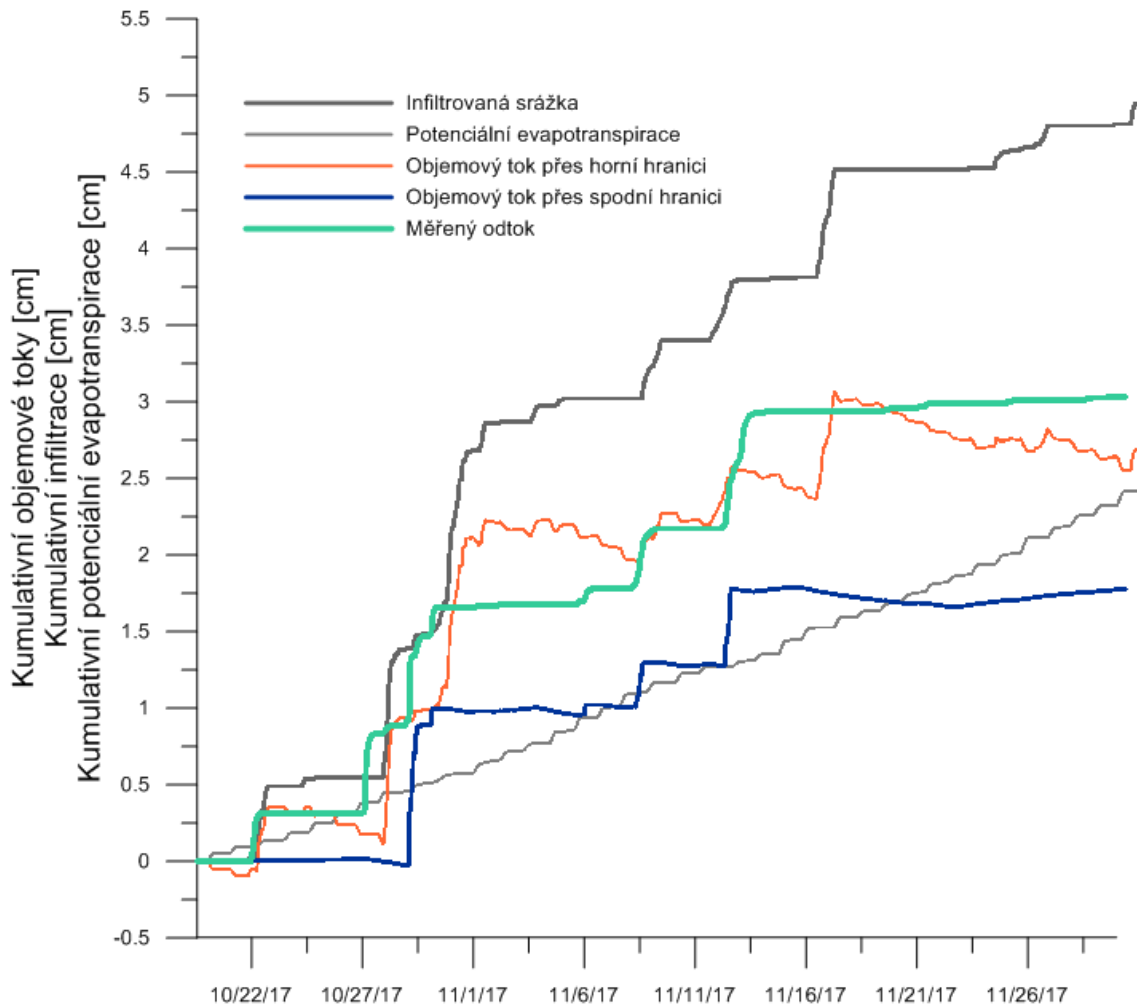
Na grafu 9 je patrný rozdíl simulovaného toku přes spodní hranici a odtoku měřeného. Celkový rozdíl těchto kumulativních odtoků na konci sledovaného období činí 0,29 cm tj, 2,9 mm.



Graf 10: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S2 se simulací z modelu HYDRUS1D

Množství infiltrované srážky zadané do modelu zůstává pro všechny simulace konstantní. Mění se hlavně objemové toky přes spodní a horní hranice. Na grafu 10 je znatelný nárůst rozdílu mezi kumulativním odtokem měřeným a modelovým, kdy měřený odtok dosahuje hodnoty 3,21 cm, tj. 32,1 mm, a rozdíl oproti modelovému odtoku dosahuje hodnoty 0,74 cm, tj. 7,4 mm.

Na grafu 11 je vidět znatelný nárůst rozdílu mezi kumulativním odtokem měřeným a modelovým, kdy měřený odtok dosahuje hodnoty 3 cm, tj. 30 mm a rozdíl oproti modelovému odtoku dosahuje hodnoty 1,78 cm, tj. 17,8 mm.



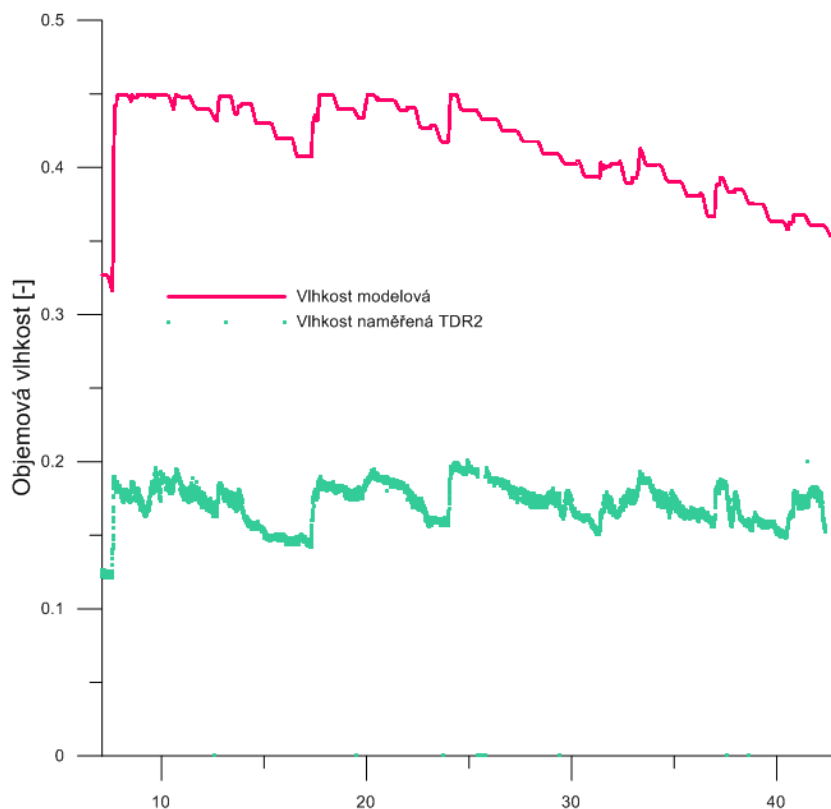
**Graf 11: Porovnání reálného odtoku ze segmentu S4 se simulací z modelu HYDRUS1D**

Simulované vlhkosti jsou v grafech 12;13 a 14 porovnány s příslušnými vlhkostmi naměřenými. Čas simulace každého ze segmentů je vyjádřen ve dnech, kdy 1. den simulace odpovídá datu 19.10.2017. První záznamy vlhkosti z měření reflektometrickými čidly po kalibraci počínají datem 26.10.2017. Vynesené vlhkosti ze simulací odpovídají stejnému datu, tzn. 7. dnu od počátku simulace.

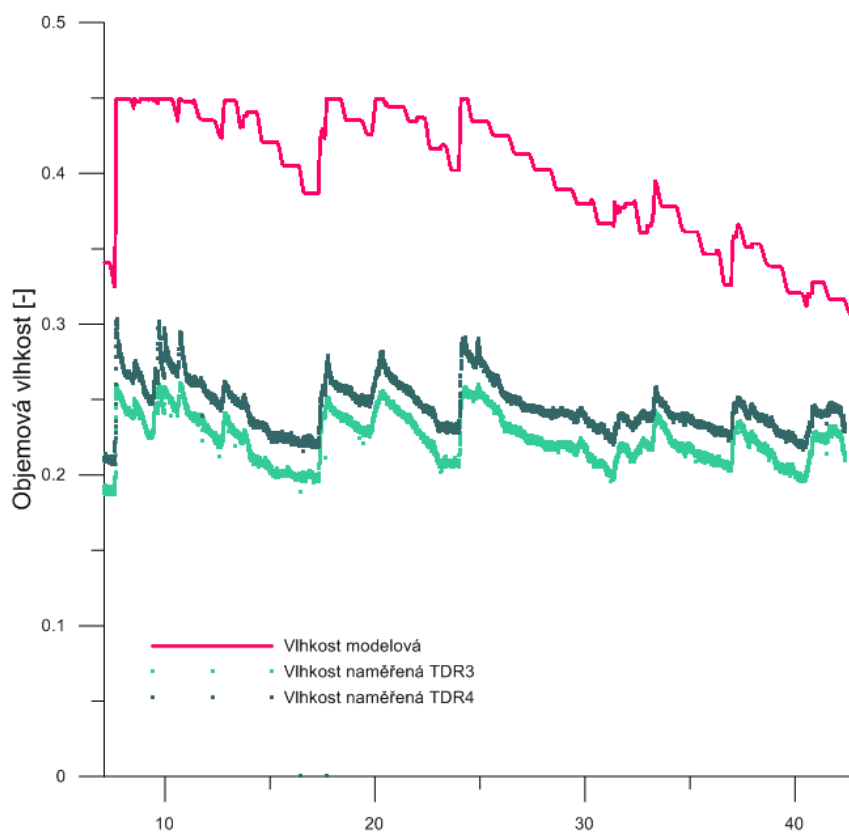
Průběh vlhkostí získaných matematickým modelováním kopíruje trend vlhkostí naměřených, nicméně hodnoty změřené vlhkostními čidly jsou podstatně níže oproti těm modelovým.

Modelové hodnoty vlhkosti ukazují, že vlhkost v segmentech s vyšší mocností substrátu je celkově menší a kolísá méně, než vlhkost v segmentech s nižší mocností substrátu. Simulace nezahrnuje působení rozchodníkového koberce.

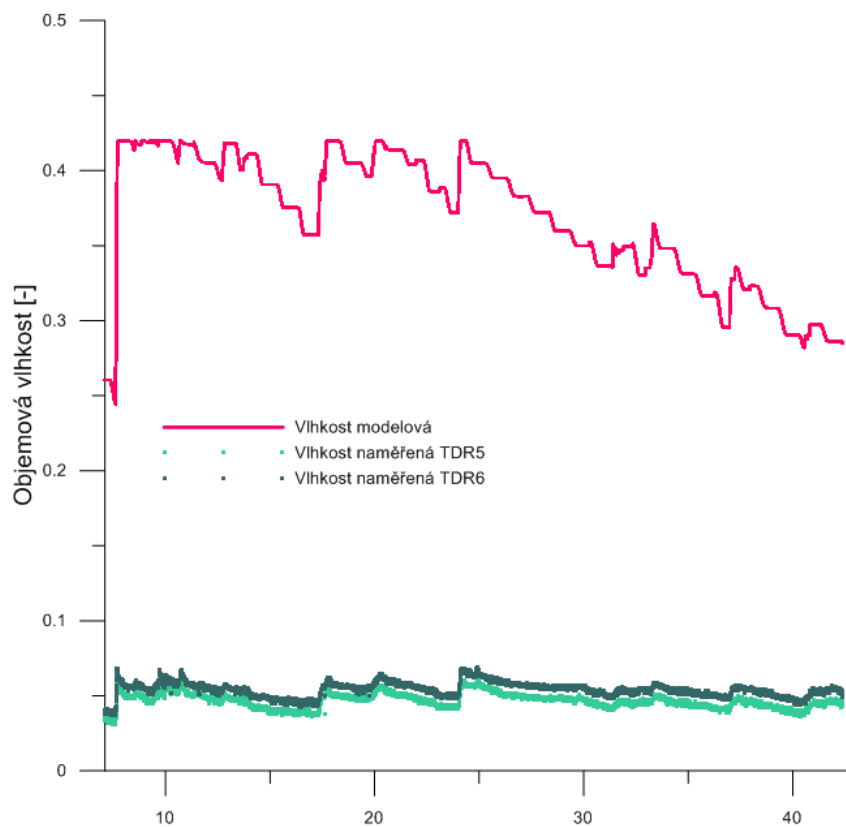




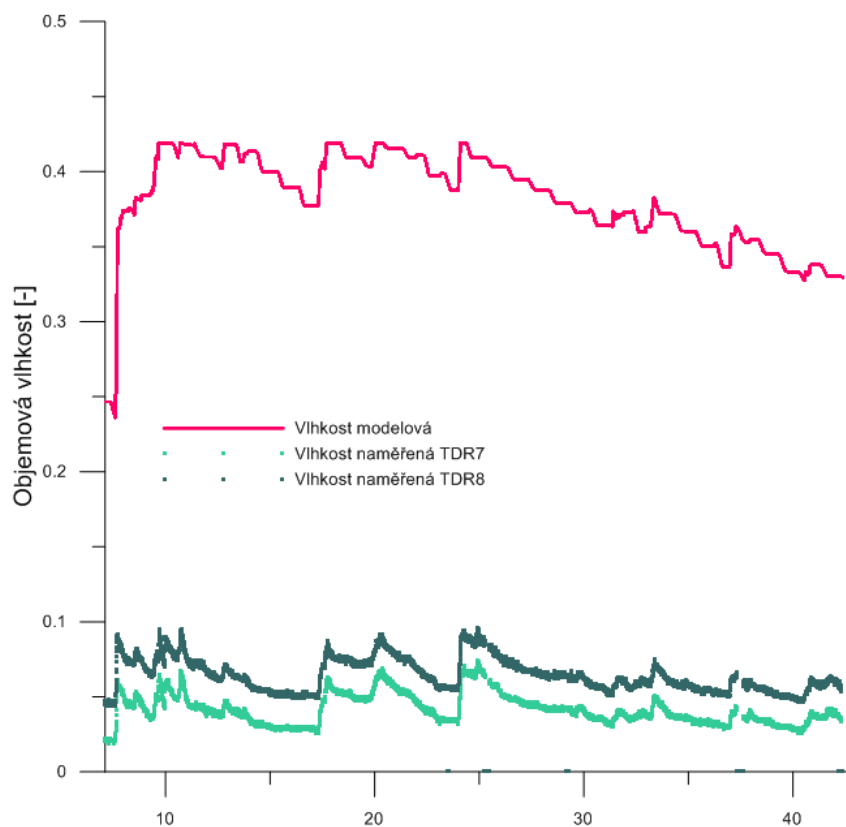
Graf 12: Porovnání vlhkostí segmentu S1 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017



Graf 13: Porovnání vlhkostí segmentu S2 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017



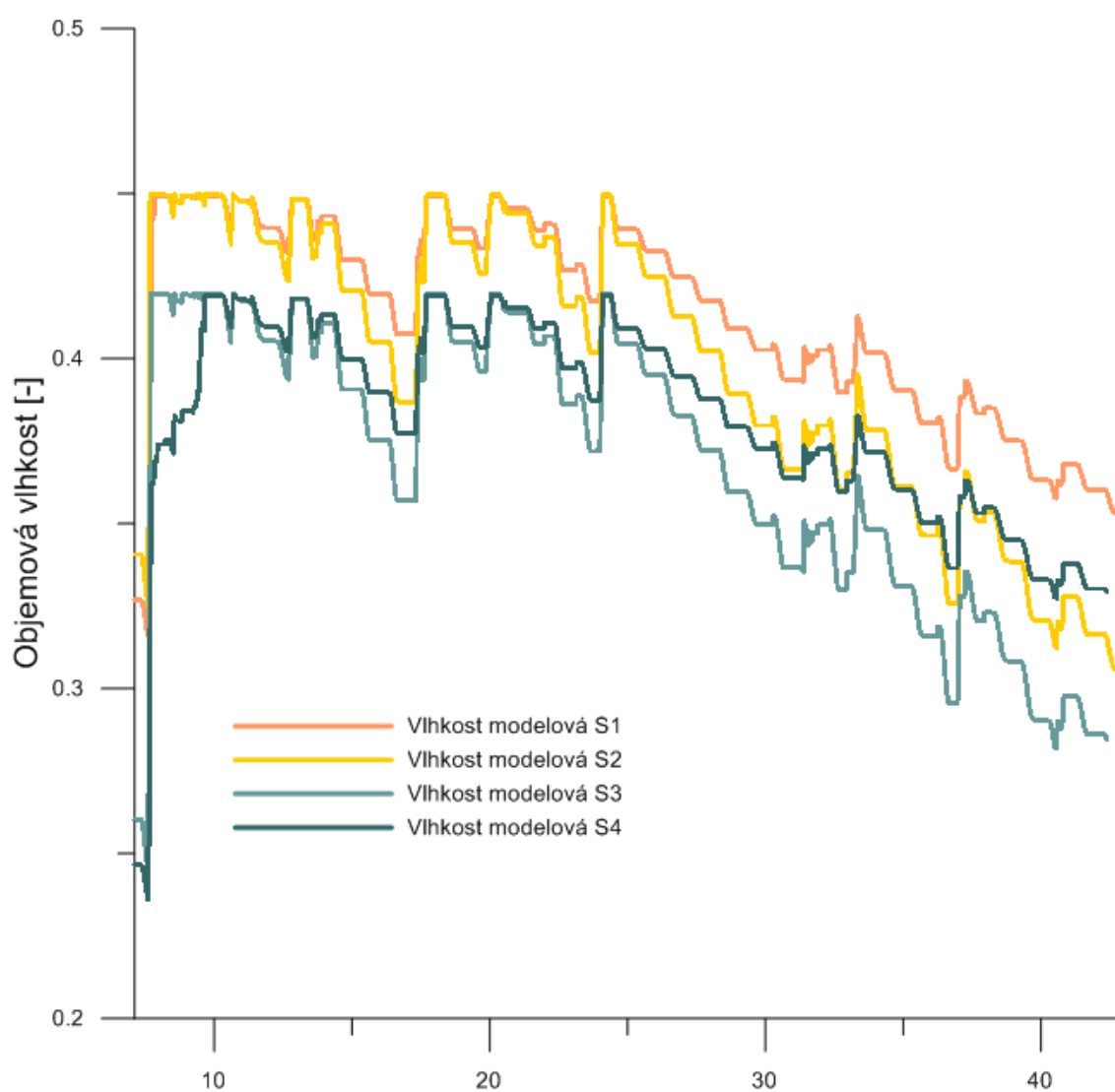
Graf 14: Porovnání vlhkostí segmentu S3 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017



Graf 15: Porovnání vlhkostí segmentu S4 se simulací z modelu HYDRUS1D pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017

Dle modelových simulací průběhu vlhkosti vyplývá, že segmenty s nižší mocností vysychají rychleji a nedosahují tak vysokých rozdílů vlhkosti při zamokření a vysychání.

Vliv hydraulických charakteristik a mocnosti substrátů na vlhkost je patrný z grafu 16, který demonstruje celkově vyšší hodnoty vlhkosti v segmentech S1 a S2 oproti segmentům S3 a S4. Segmenty S1 a S2 dosahují vyšších hodnot vlhkosti vzhledem k vyšší hodnotě nasycené vlhkosti použitého substrátu. Segmenty s vyšší mocností substrátu vykazují vyšší vlhkost.



Graf 16: Porovnání modelových vlhkostí ze všech segmentů pro simulované období od 26.10.2017 do 30.11.2017

## 8 Diskuze a závěr

Diplomová práce se zabývala vyhodnocením vodního a teplotního režimu jednotlivých experimentálních segmentů zelených střech, které byly založeny na zelené střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze. Výsledky pozorování byly interpretovány pomocí matematického modelování.

Z výsledků půlročního monitoringu experimentálních ploch zelených střech vyplývá, že segmenty, na kterých jsou uloženy rozchodníkové koberce, vykazují po infiltraci srážky vyšší vlhkost, kterou si déle drží. Vlhkost klesá postupně a voda ze segmentu odtéká pomaleji. Lze předpokládat, že husté pokrytí vegetací zmírňuje výpar a substrát zůstává vlhčí. Na druhou stranu zde působí dle předpokladu větší míra evapotranspirace, protože rostliny natahují vlhkosti ze substrátu svými kořeny a vypařují ji ze svého povrchu, nicméně na datech je znatelný spíše markantnější výpar ze segmentů minimálně pokrytých vegetací. Při daném chování segmentů s rozchodníkovými koberci lze předpokládat, že se u těchto segmentů daří rostlinám lépe, jelikož mají vyšší zásobu vody pro své využití. Naopak lze očekávat, že při vydatnějších srážkách a vyšší vlhkosti v substrátu z předchozí srážky bude v segmentech S2 (substrát ACRE a rozchodníkový koberec) a S3 (substrát BB Com a rozchodníkový koberec) dosaženo rychleji maximální vodní kapacity při snížené míře drenáže. Zda došlo ve sledovaném období k výtopě na některém ze segmentů, není zjištěno. Z hlediska ovlivňování mikroklimatu výparem působí segmenty S2 a S3 svou sníženou mírou evapotranspirace méně efektivně oproti segmentům S1 (substrát ACRE a řízky rozchodníků) a S4 (substrát BB Com a řízky rozchodníků), ze kterých se vypaří více vody a rychleji.

Z koeficientů odtoků určených pro celé sledované období vyplývá, že ze segmentu S1 odtéká 46 % celkového obdrženého množství vody. Podobných hodnot dosahuje také odtokový koeficient segmentu S4, ze kterého odteče o 3 % více, než ze segmentu S1. Nejvíce vody odtéká ze segmentu S2, celkem 53 % objemu vody obdržené srážkami. Na vyšší odtok ze segmentu S2 mohla mít vliv nižší mocnost substrátu a tím nižší schopnost retence vody. Měřené hodnoty odtoku ze segmentu S3 byly z analýz vyloučeny z důvodu podezření na mechanické poškození překlápěcích člunků..

Výsledky monitorování teplotního režimu zelené střechy dokládají trend zelených střech ochlazovat prostředí v průběhu teplých dní, zatímco při nižších teplotách a teplotách pod bodem mrazu byl okolní vzduchu ve 2 m nad úrovní zelené střechy někdy i o 10°C teplejší ve srovnání s referenční plochou.



Segmenty S2 a S3 vykazovaly v teplejších měsících průměrně nižší hodnoty teplot substrátů oproti segmentům S1 a S4 a vyšší hodnoty teplot substrátu v měsících, kdy se průměrné hodnoty teploty vzduchu dostávají pod bod mrazu.

Výsledky potenciální evapotranspirace získané výpočtem poukazují na to, že při zvýšené vlhkosti vzduchu je schopnost evapotranspirace snížena.

Vývoj vegetace od založení experimentu do konce sledovaného období nelze řádně vyhodnotit. Sledované období se minulo s vegetačním obdobím rostlin a vzhledem k nízkým hodnotám teploty na přelomu roku 2017/2018 a sníženému solárnímu osvětlení danému zimním obdobím lze pozorovat spíše úhyn vegetace a její přezimování. Vegetační období nastává s koncem sledovaného období pro účely diplomové práce. Monitoring a kontrola stavu vývoje založeného experimentu probíhá i nad rámec závěrečné práce k dalšímu vyhodnocování vodního a teplotního režimu experimentálních ploch zelených střech.

Měření bodů retenční čáry v suché oblasti přístrojem na měření vlhkostního potenciálu může být zatíženo chybou vzniklou pronikáním vzdušné vlhkosti do vzorků při jejich manipulaci a transportu, ačkoliv bylo dbáno na to, aby byly vzorky uchovávány s co nejmenším rizikem prostupu vzdušné vlhkosti. Tato chyba může mít vliv na parametry retenčních křivek jednotlivých segmentů. Parametry byly použity pro modelování.

Nejlepší shoda mezi skutečnými odtoky a jejich simulacemi nastala v případě segmentu S1, kdy rozdíl celkového odtoku měřeného a modelového je 2,9 mm. Model mírně nadhodnocuje množství odtékající vody. Naopak nejhůře je nasimulován segment S4, jehož odtok je modelem podhodnocen a rozdíl kumulativního odtoku naměřeného a modelového na konci sledovaného období činí 17,7 mm.

Vzhledem k tomu, že potenciální evapotranspirace byla v modelu uvažována stejná pro všechny segmenty, jsou výsledné vlhkosti v segmentech S2 a S3 nižší oproti vlhkostem v substrátech s vyšší mocností. Nejvyšší vlhkosti je modelem dosaženo v segmentu S1. Trend průběhu vlhkostí všech segmentů kopíruje trend vlhkostí naměřených. Rozdíly v hodnotách by bylo třeba ověřit novou kalibrací čidel TDR pro dané substráty a optimalizací modelu. Vzhledem k nízkým mocnostem substrátů se nabízí možnost použít čidla potenciálu.

Výsledky modelu by bylo možné optimalizovat zavedením vrstveného prostředí segmentů S2 a S3 a změřením hydraulických charakteristik rozchodníkového koberce, které by byly následně do modelu zadány.



Další možností optimalizace modelu je zavedení informace o kořenové zóně a uvážení jejího působení na proudění vody v substrátu. Tyto náměty na optimalizaci mohou být dalším předmětem zkoumání k rozšíření práce.

Zajímavým námětem na předmět dalšího zkoumání je kvalita vody odtékající ze souvrství zelené střechy.

V rámci diplomové práce nebylo reálné získat dlouhodobější data, převážná část všech aktivit byla věnována optimalizaci celého systému a zajištění jeho funkčnosti. V současnosti experiment pokračuje a jsou získávána kvalitní data k dalšímu zpracování dle uvedených metod. K dosažení shody mezi měřeními a simulovanými průběhy tak lze využít inverzní modelování, které by vedlo k zpřesnění hydraulických charakteristik daného prostředí.

## 9 Seznam použitých zdrojů

- Angers, D., & Caron, J. (1998). *Plant-Induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks* (Vol. 42).
- Azeñas, V., Cuxart, J., Picos, R., Medrano, H., Simó, G., López-Grifol, A., & Gulías, J. (2018). Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. *Energy and Buildings*, 164, 226-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.010>
- Bengtsson, L., Olsson, J., & Grahn, L. (2005). *Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden* (Vol. 36).
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R., & Arcuri, N. (2016). Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, 122, 63-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.062>
- Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), 1261-1274. doi: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x
- Czemieli Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Český hydrometeorologický ústav: Historická denní data. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz>
- De-Ville, S., Menon, M., Jia, X., Reed, G., & Stovin, V. (2017). The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. *Journal of Hydrology*, 547, 332-344. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.006>
- Dubský, Martin. *Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví: Chemický rozbor: Střešní substrát BB Com*, (2015).
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6), 959-965. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>
- FLL: Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing. Bonn: Research Society for Landscape Development and Landscape Construction, 2008.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations: *FAO Penman-Monteith equation*. Dostupné z: <http://www.fao.org/home/en/>
- Graceson, A., Hare, M., Hall, N., & Monaghan, J. (2014). Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. *Biosystems Engineering*, 124, 1-7. doi: <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.05.007>
- Gregoire, B. G., & Clausen, J. C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37(6), 963-969. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.02.004
- Jelinkova, V., Dohnal, M., & Pícek, T. (2015). A Green Roof Segment for Monitoring the Hydrological and Thermal Behaviour of Anthropogenic Soil Systems. *Soil and Water Research*, 10(4), 262-270. doi: 10.17221/17/2015-swr
- Jelinkova, V., Dohnal, M., & Sacha, J. (2016). *Thermal and water regime studied in a thin soil layer of green roof systems at early stage of pedogenesis* (Vol. 16).
- Kutílek, M. *Vodohospodářská pedologie*. 1. vydání, Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1963. 210 s..
- Kutílek, M., V. Kuráž, M. Císlarová. *Hydropedologie* (1996), dotisk 1. vydání. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-00956-4
- Kutílek, M. *Vlhkost pórovitých materiálů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, (1984), s. 212.



- Lazzarin, R. M., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260-1267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.001>
- Lehmann, S. (2014). Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. *City, Culture and Society*, 5(1), 1-8. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ccs.2014.02.002>
- Letecký snímek experimentálního stanoviště (autor snímku J. Krása)
- Lu, J., Yuan, J.-g., Yang, J.-z., Chen, A.-k., & Yang, Z.-y. (2015). Effect of substrate depth on initial growth and drought tolerance of *Sedum lineare* in extensive green roof system. *Ecological Engineering*, 74, 408-414. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.018>
- Luckett, K., *Green Roof Construction and Maintenance*.
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217-226. doi: <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Miller, C. (1998). Vegetated Roof Covers: A new method for controlling runoff in urbanized areas.
- Moghbel, M., & Erfanian Salim, R. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO<sub>2</sub> content. *Urban Climate*. doi: <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.012>
- Molineux, C. J., Gange, A. C., & Newport, D. J. (2017). Using soil microbial inoculations to enhance substrate performance on extensive green roofs. *Science of The Total Environment*, 580, 846-856. doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.031>
- Omega Engineering: *Equilibrium Relative Humidity Saturated Salt Solutions*. Dostupné z: <https://www.omega.com/temperature/z/pdf/z103.pdf>
- Operator's Manual: *WP4C Dew Point Potential Meter*, Decagon Devices, (2016).
- Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. G. (2009). Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology*, 379(1), 193-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.008>
- Penman, H. L. (1948). NATURAL EVAPORATION FROM OPEN WATER, BARE SOIL AND GRASS. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-&. doi: 10.1098/rspa.1948.0037
- Protokol o zkoušce: *Ústav technologie vody a prostředí VŠCHT*, (2017).
- Rumble, H., & Gange, A. C. (2017). Microbial inoculants as a soil remediation tool for extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 102, 188-198. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.025>
- Schaap, M. G., & van Genuchten, M. T. (2006). A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*, 5(1), 27-34. doi: 10.2136/vzj2005.0005
- Sedum Top: *Evergreen roof solutions*. Dostupné z: <http://sedumtop.cz/>
- Sedum Top: *Technický list SedumTopMat/S5*.
- Simunek, J. J., Saito, H., Sakai, M., & Van Genuchten, M. (2008). *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*.
- Sněhota, M., V. Jelínková, J. Šácha, V. Bareš a T. Vogel. Meteorologická měření v okolí budovy UCEEB. (2015).
- Solecki, W. D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., & Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 6(1), 39-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002>
- Sun, T., Bou-Zeid, E., & Ni, G.-H. (2014). To irrigate or not to irrigate: Analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model. *Building and Environment*, 73(Supplement C), 127-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.004>





- TDR *Instruction manual: Campbell Scientific.* Dostupné z:  
<https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/tdr100.pdf>
- van Genuchten, M. T. (1980), *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*
- Villarreal, E. L., & Bengtsson, L. (2005). Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*, 25(1), 1-7. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008>
- Vokál, J., *Podniková norma: Střešní substrát ACRE.* (2011) Dostupné z: <http://www.acre.cz/cs/>
- Wang, X., Tian, Y., & Zhao, X. (2017). The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. *Science of The Total Environment*, 592, 465-476. doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.124>
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7266-7273. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
- Zelené střechy: *Standardy pro navrhování, provádění a údržbu.* (2016). Dostupné z: [http://www.novazelenausporam.cz/file/786/zelene-strechy\\_standardy.pdf](http://www.novazelenausporam.cz/file/786/zelene-strechy_standardy.pdf)