



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta stavební  
Katedra hydrauliky a hydrologie

# **Odtokové poměry segmentů zelených střech**

Bakalářská práce

## **Runoff regime of green roof segments**

Bachelor Thesis

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

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

**Vojtěch Skala**

---

Praha 2016



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství  
studijní obor: Inženýrství životního prostředí  
akademický rok: 2015/2016

Jméno a příjmení studenta: Vojtěch Skala  
Zadávací katedra: K141 - Katedra hydrauliky a hydrologie  
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph. D.  
Název bakalářské práce: Odtokové poměry segmentů zelených střech  
Název bakalářské práce  
v anglickém jazyce: Runoff regime of green roof segments

Rámcový obsah bakalářské práce: Vyhodnoťte detenční charakteristiky srážko-odtokových epizod v případě dvou testovacích segmentů zelené střechy. Zjistěte odtokové koeficienty obou segmentů v letech 2014 a 2015. Diskutujte časové změny odtokových poměrů segmentu s ohledem na jejich vegetační pokryv a charakter hydrologického roku. Posuďte možnost modelování odtoku ze segmentu metodou lineárního rezervoáru.

Datum zadání bakalářské práce: 18. 2. 2016 Termín odevzdání: 22. 5. 2016  
(vyplňte poslední den výuky příslušného semestru)


Pokud student neodevzdal bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu bakalářskou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998. (SZŘ ČVUT čl. 21, odst. 4)

*Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

  
vedoucí bakalářské práce

  
vedoucí katedry

Zadání bakalářské práce převzal dne: 18. 2. 2016

  
student

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x student, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání BP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se BP do databáze KOS.

BP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student BP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci studijních programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)

---

## Abstrakt

Práce popisuje význam zelených střech v urbanizovaných oblastech s důrazem na jejich odtokové poměry. Dále pak experiment, konaný na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradu, jehož předmětem jsou odtokové a tepelné poměry zelených střech. Dva testovací segmenty zelené střechy jsou průběžně monitorovány řadou přístrojů od července 2014. Retenční schopnost segmentů byla vyhodnocena ve vztahu k parametrům srážkových epizod a stáří vegetace. Také byl sestaven jednoduchý model kaskády lineárních rezervoárů pro predikci odtoku z experimentálních segmentů. Podařilo se zjistit změny retenčních schopností testovacích segmentů v čase. Tyto změny navíc závisí na charakteru srážky a aktuálním stavu vegetačního krytu. Z výsledků dále plyne, že největší vliv na vlastnosti zelené střechy má použitý substrát, jeho stáří a kvalita. Získané poznatky lze využít při navrhování a realizaci zelených střech nebo při odhadu vlivu nově navrhovaných zelených střech na odtok dešťové vody z řešené oblasti.

**Klíčová slova:** zelená střecha, testovací segment zelené střechy, odtokový koeficient, kaskáda lineárních rezervoárů

## Abstract

In this thesis, there is described an importance of green roofs in an urbanized area. The main focus has been given to runoff regime. An ongoing experiment on roof of University Centre for Energy Efficient Buildings in Buštěhrad is described. The research subject is thermal and runoff regime of green roofs. Two test beds of green roof have been continuously monitored by a variety of instruments since July of 2014. The impact of rainfall events and vegetation properties has been observed on test beds retention ability. Moreover, a simple model based on cascade of linear reservoirs was built for runoff prediction from test bed. It was found that retention ability of test beds varies in time. These changes depend on rainfall properties and current status of vegetation cover. The results also indicate that the used substrate, its age and quality have the highest impact on green roof behavior. The gained knowledge can be used for design and implementing green roofs. Furthermore, results can be used assess the impact of newly proposed green roofs in terms of rainwater detention.

**Keywords:** green roof, test bed, green roof segment, runoff coefficient, cascade of linear reservoirs

---

## Čestné prohlášení

Na svou čest prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce doc. Ing. Michala Dohnala, Ph.D. Dále prohlašuji, že použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu literatury.

Souhlasím s užitím tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. 5. 2016

Vojtěch Skala

---

## Poděkování

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Michalovi Dohnalovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a detailní připomínky k práci.

Dále děkuji Ing. Vladimíře Jelínkové, Ph.D. za poskytnutí podkladů a datových souborů, týkajících se probírané problematiky.

---

## Obsah

1. Úvod .....	7
1.1. Motivace práce.....	7
1.2. Cíl a struktura práce.....	7
2. Teoretická část .....	8
2.1. Význam a funkce zelených střech.....	8
2.1.1. Redukce odtoku dešťové vody.....	8
2.1.2. Funkce vegetace a redukce teploty .....	9
2.1.3. Ochranná a ekonomická funkce.....	9
2.1.4. Ekologická a estetická funkce.....	9
2.2. Typy zelených střech .....	9
2.2.1. Extenzivní střechy.....	9
2.2.2. Polointenzivní střechy .....	9
2.2.3. Intenzivní střechy .....	10
2.3. Odtokové poměry a hydrologický režim zelených střech .....	10
3. Materiály a metody .....	12
3.1. Popis experimentu .....	12
3.2. Možnosti segmentů.....	13
3.3. Technický popis segmentů .....	13
3.3.1. Konstrukce segmentů .....	13
3.3.2. Průřez segmentem.....	13
3.3.3. Použité substráty a vegetace .....	14
3.4. Vyhodnocované období .....	16
3.5. Charakteristiky epizod.....	16
3.6. Vliv vegetace na odtokové koeficienty .....	17
3.7. Hydrologická bilance.....	17
3.8. Model kaskády lineárních rezervoárů .....	18
4. Výsledky a diskuze .....	20
4.1. Vyhodnocení charakteristik epizod .....	20
4.1.1. Relativní četnost srážek.....	20
4.1.2. Průměry odtokových koeficientů .....	20
4.1.3. Statistické ukazatele .....	21
4.1.4. Závislost odtokových koeficientů na vlastnostech epizod .....	22
4.2. Vliv vegetace na odtokové koeficienty .....	22
4.3. Celkové odtokové koeficienty v roce 2014 a 2015.....	24
4.4. Výpočet hydrologické bilance .....	25
4.5. Model kaskády lineárních rezervoárů .....	27
5. Závěr .....	30
6. Seznam obrázků.....	31
7. Seznam tabulek .....	32
8. Seznam použité literatury .....	33

---

# 1. Úvod

## 1.1. Motivace práce

Jak zachovat ekologický stav Země by mělo být otázkou pro člověka od chvíle, kdy začal globálně ovlivňovat podnikání a životní prostředí. Nepřetržitě rostoucí a rozvíjející se populace lidí postupně rozšiřuje svá sídla a tím působí převážně negativně na přírodu a její procesy. Výzkumy, zabývající se tímto problémem, jsou stále detailnější, aby mohly lépe omezit antropogenní účinky na životní prostředí. Jedním z možných řešení jsou plochy pokryté zelení, které dokáží zadržet vodu, ochlazovat okolí, čistit vzduch a vytvářet ekosystém pro živočichy. Z hlediska trvale udržitelného rozvoje je jejich zachování ve městských oblastech klíčové.

Zeleň se tak stala nedílným ekologickým i estetickým prvkem obydlených území. Většina se jí vysazuje z ekonomických či technických důvodů do člověkem přetvořené půdy. Tyto půdy, stejně jako celkový vliv uměle vysazené zeleně na okolí, je však třeba průběžně pozorovat a zkoumat. Jejich vlastnosti se mohou lišit od vlastností přirozeně rostoucí vegetace.

Vhodným místem pro vysazení vegetace se v poslední době stále častěji stávají střechy budov. Tento trend přichází postupně ze zahraničí i do České republiky. V Německu nebo USA jsou realizace těchto zelených, vegetačních či ozeleněných střech běžné. Místní mikroklima zlepšují podobně jako přízemní zeleň hned několika způsoby. Hlavními jsou snižování efektu tepelného ostrova<sup>1</sup> městských aglomerací, zvýšení kvality ovzduší a redukce odtoku dešťové vody. Tyto funkce ovlivňuje zejména tepelný a hydrologický režim ozeleněné střechy. Pomocí řady měření (například teploty a vodní bilance) doplněných o meteorologická měření spolu se znalostí fyzikálních a chemických vlastností půdního substrátu, je pozorováno chování těchto zelených ploch.

## 1.2. Cíl a struktura práce

Cílem práce je lepší pochopení hydrologického režimu zelených střech, jeho vývoje a závislosti na vnitřních i vnějších podmínkách. K dosažení tohoto cíle byla použita analýza odtokových a retenčních parametrů dvou testovacích segmentů zelené střechy s rozdílnou antropogenní půdou na střeše Univerzitním centra energeticky efektivních budov v Buštěhradu. Práce se tedy zabývá sledováním vývoje hydrologických parametrů a vegetace segmentů v čase. Dále pak jednotlivými srážkoodtokovými epizodami, které vykazují rozdílné chování v závislosti na stáří půdního systému, vegetace, velikosti srážkového úhrnu a dalších vlivech. V práci lze také nalézt modelování odtoku ze segmentů na principu kaskády lineárních rezervoárů a popis chování tohoto modelu při aplikaci různých koeficientů kaskád lineárních rezervoárů. Sledovaným obdobím jsou vegetační sezóny v letech 2014 a 2015.

První část bakalářské práce obsahuje rešerši literatury na téma odtokové poměry zelených střech, dále pak popisuje význam, výhody a rozdělení vegetačních střech. Další kapitola přibližuje samotný experiment a technický popis segmentů. Také v ní lze nalézt obecný popis metod, použitých k analýzám. Následuje praktická část, kde je popsána aplikace metod a vyhodnocení výsledků. Posledním oddílem je závěr s celkovým zhodnocením experimentu a dosažených výsledků.

---

<sup>1</sup> Tento efekt je známý z městských oblastí, kde je zejména v jejich centru vyšší průměrná teplota než na okrajích. Ta je zvyšována primárně neochlazovanými antropogenními plochami, sekundárně potom odpadním teplem z budov a dopravy.

---

## 2. Teoretická část

### 2.1. Význam a funkce zelených střech

Zelené střechy jsou známy již delší dobu. Od středověku využívaly hlavně evropské severské státy jejich výhody. Moderní architektura je ze začátku chápala spíše jako estetický prvek. Toto myšlení změnil jako jeden z prvních francouzský architekt Le Corbusier v rámci jeho Pět bodů moderní architektury, které publikoval již v roce 1927. Druhý bod těchto zásad říká, že ploché střechy budov umožňují vybudování střešní zahrady nahrazující zeleň, kterou dům místu odebral (např. Šimečková et al., 2010).

Ekologické smýšlení o zelených střechách je velmi důležité, protože by mohly být částečným řešením problémů, které sebou přináší globální změna klimatu. V České republice jsou to například suchá léta s přivalovými dešti, způsobujícími bleskové povodně. Jednou z příčin jsou v městských oblastech nesporně již zmiňované rozšiřující se málo propustné plochy. Při plošném použití zelených střech by byl jejich pozitivní dopad významný, zejména v podmínkách měnícího se klimatu (Jelínková et al., 2015).

Jejich hlavní výhodou je tedy potenciální retence půdy, která snižuje odtok a je schopna zcela zabránit malým srážkám nebo snížit či zpozdit větší srážky. Tím se snižuje zatížení dešťové kanalizace. Kromě regulace vodního režimu vykazují zelené střechy i některé další nezanedbatelné výhody, jako například snížení kolísání teplot a celkové ekologické zátěže v oblasti. Také slouží jako ochranná vrstva konstrukce střechy a tepelná izolace. Některé typy zelených střech jsou uzpůsobeny k rekreaci a tím mohou zvyšovat atraktivitu celé stavby pro případného kupce. Obecně by hrály ozeleněné střechy významnou roli v rámci udržitelného rozvoje městských aglomerací. Jejich použití v regionálním měřítku je však v současné době v ČR bez legislativních změn jen těžko představitelné (Jelínková et al., 2015).

Oproti klasickým střechám mají i řadu nevýhod, jako například vyšší pořizovací cenu, drahou implementaci do stávajících staveb, potřebu údržby a vysoké náklady na ní, složitost konstrukce a riziko selhání (vegetace může být vytlačena náletovými rostlinami, nedostatečná vrstva substrátu způsobí uhynutí vegetace atd.).

Chování a vlastnosti zelených střech jsou závislé na místním klimatu, zvolené vegetaci, substrátu, sklonu, typu konstrukce střechy a dalších faktorech. V následujících kapitolách jsou podrobněji rozepsány jejich výhody.

#### 2.1.1. Redukce odtoku dešťové vody

Hlavní funkcí zelených střech je redukce odtoku dešťové vody. Část vody, spadlá na plochu střechy, je přímo zachycena rostlinami a následně evapotranspirací spolu s vodou, zadržanou půdním systémem, dopravena zpět do atmosféry. Zbytek vody odtéká do dešťové kanalizace, stejně jako u střech s klasickou konstrukcí. V případě zelené střechy se ovšem jedná o menší objem, navíc s příznivěji rozloženou intenzitou odtoku v čase. Zatímco voda ze zpevněných ploch odtéká okamžitě, dochází u zelených střech ke zpoždění odtoku, jeho prodloužení a snížení maximálního průtoku. V případě menších srážek může dojít k jejich úplné eliminaci. Výhodou tohoto efektu je, že odlehčuje často přetěžovanou kanalizační síť.

Tato funkce zelené střechy, stejně jako některé další, nejvíce závisí na použitém substrátu. Nejčastěji se používá technosol, antropogenní zemina složená převážně z technogenních materiálů, jako například drcená stavební suť a keramzit.

Zelené střechy také lze kombinovat s cisternami a vsakovacími zařízeními. V tomto případě není nutné napojovat na kanalizaci. Nashromážděnou vodu lze použít na splachování WC a zavlažování zahrad (Schiefler, 2005).



---

### 2.1.2. Funkce vegetace a redukce teploty

Vegetace a její substrát slouží jako tepelná izolace v zimním období, v letních naopak ochlazuje povrch střechy. Tím snižuje teplotní zatížení konstrukce. Vegetace totiž absorbuje část slunečního záření a jeho energii využije na již zmiňovaný výpar. Diverzifikace vegetace má pozitivní vliv na její teplotní funkci (Kolb et al., 1993). Na volbě použitých druhů tedy závisí celková funkce vegetační střechy.

### 2.1.3. Ochranná a ekonomická funkce

Zelené střechy prodlužují životnost hydroizolační vrstvy potažmo celé nosné konstrukce střechy. Chrání totiž střešní plášť před UV zářením a extrémními teplotními rozdíly. Také přispívají ke zlepšení tepelné izolaci stavby a snižují tak náklady na vytápění v zimě, nebo naopak klimatizaci v létě. Současně s tím je však třeba uvědomit si také jejich negativní stránku a to ekonomickou a technologickou náročnost při výstavbě. Ta však může být kompenzována zvýšenou prodejní cenou nemovitosti, možností rekreačního využití či dotací, kterou již některé země EU poskytují (Schiefler, 2005).

### 2.1.4. Ekologická a estetická funkce

Vegetace zelené střechy zachycuje prach a jiné škodliviny a zároveň ochlazuje a zvlhčuje okolní vzduch. Tím přispívá ke zlepšení mikroklimatu. Její povrch také lépe absorbuje zvuk než střechy z běžných materiálů a snižuje tak hluk přicházející ve městech například z dopravy. Některé druhy rostlin mohou navíc vytvářet vhodné prostředí pro život menších živočichů.

Zelené střechy také zpřijemňují vzhled obydlených území. Pohled na ně je příjemný na rozdíl například od plechové střechy, která velmi odráží sluneční světlo. Kladně působí na psychiku obyvatel (Šimečková et al., 2010).

## 2.2. Typy zelených střech

Ať už je využití zelené střechy jakékoli, skládá se střešní nástavba zpravidla z vegetační vrstvy, substrátu, filtrační vrstvy, drenážní vrstvy, ochranné vrstvy a vrstvy proti prorůstání kořenů (Optigreen, 2016). Volba jednotlivých vrstev závisí hlavně na použité zeleni, která může být extenzivní, polointenzivní nebo intenzivní. V následujících kapitolách je uvedena stručná charakteristika střech s těmito typy zeleně. Tab. 1 zobrazuje reálný příklad vlastností extenzivních a intenzivních střech.

### 2.2.1. Extenzivní střechy

Jedná se o střechy s nenáročnou, druhově méně rozmanitou vegetací, která se vyvíjí, a regeneruje převážně sama. Ukládá se do substrátu o tloušťce 50-150 mm. Většinou je tvořena různými druhy rozchodníků, mechů, travin, bylin a trvalek. Hmotnost konstrukce se pohybuje mezi 60 a 150 kg/m<sup>2</sup>. Je jí možno použít na plochou i šikmou střechu. Není jí třeba udržovat, a proto nemusí být přístupná nebo mít automatický závlahový systém. Jednou nebo dvakrát do roka je však třeba zkontrolovat konstrukci střechy a stav zeleně. Náklady na ni jsou proto nižší než na střechu intenzivní.

### 2.2.2. Polointenzivní střechy

Střecha s touto zelení tvoří přechod mezi extenzivní a intenzivní střechou. Tloušťka jejího souvrství je od 100 do 300 mm. Stejně jako střechy extenzivní nevyžaduje náročnou údržbu a složitý závlahový systém. Její nároky na vodu jsou ale vyšší, protože na ní lze použít i vyšší byliny a keře.

Tab. 1: Příklad vlastností zelené střechy Duo společnosti Optigrün International AG s vynikající tepelnou izolací proti sezónním výkyvům teplot, za použití extenzivní či intenzivní zeleně (upraveno z Optigreen, 2016)

Typ střechy	Hmotnost [kg/m <sup>2</sup> ]	Výška souvrství <sup>2</sup> [mm]	Sklon [°]	Druh vegetace	
extenzivní	110	100	1-5 (5-30 šikmé)	rozchodníky, byliny, trávy	
intenzivní	360	350	1-5	trvalky, dřeviny	

Typ střechy	Finanční náročnost	Ekologická hodnota	Náročnost údržby	Akumulace vody [l/m <sup>2</sup> ]	Součinitel odtoku [-]
extenzivní	malá	nízká	nízká	cca. 20	0.50
intenzivní	velká	vysoká	vysoká	cca. 100	0.10

### 2.2.3. Intenzivní střechy

Intenzivní zelené střechy jsou nejnáročnějšími z hlediska konstrukce i údržby. Jejich substrát má tloušťce vyšší než 200 mm, hmotnost přesahuje 300 kg/m<sup>3</sup>. Největší výhodou je, že umožňují různé druhy rekreace. Mají vysokou druhovou rozmanitost (květiny, keře i nižší stromy) a zatravněné pochozí části. Díky tomu vyžadují jak vysoké náklady na výstavbu, tak na údržbu. Často je potřeba zřídit automatický závlahový systém.

## 2.3. Odtokové poměry a hydrologický režim zelených střech

Na toto téma bylo zpracováno mnoho výzkumů a prací. Od prostého konstatování vodní kapacity substrátu až po víceletá šetření v terénu. Získané výsledky lze však těžko přenést na jiné lokality. Například zadrží-li střecha na jednom místě 70 % srážek, nelze očekávat stejný výsledek u stejné střechy na jiném místě, kde budou jiné klimatické podmínky. Především bude záležet na charakteru srážek (místním rozdělení, četnosti a intenzitě). Oblasti s malým počtem intenzivních srážek s velkým úhrnem budou vykazovat vyšší procento odtoku než teplé oblasti s vysokým počtem krátkých epizod a tedy i celkově vyšším ročním úhrnem, protože zde voda zachycená půdním substrátem bude čelit vyšším požadavkům na výpar (Šimečková et al., 2005).

Obecně lze říct, že zelené střechy zadrží 42-85 % ročního srážkového úhrnu. V teplých oblastech zadržují v průměru více vody. V letních obdobích závisí jejich retenční schopnost na použité technologii. Podstatné je u intenzivních zelených střech počítat se zadržováním vody v akumulačních drenážních nádržích (Šimečková et al., 2010).

Některé matematické modely jsou schopny simulovat průběh odtoku dešťové vody a přibližně tak určit retenční vlastnosti zelené střechy v daném místě. Jedním z těchto programů je například RWS (RegenWasserSpeicher, rezervoár dešťové vody), u kterého je možné zohlednit formu ozelenění (konstrukci vrstev), sklon střechy, velikost plochy a místní údaje o srážkách. Program následně provede simulaci retenčních a výparných procesů a vypočítá roční odtok, dlouhodobý průměrný odtok za několik let a maximální okamžitý odtok. Tím lze předpovídat chování zvolené ozeleněné střechy v různých lokalitách. Vyšší přesnosti měření lze dosáhnout při vložení meteorologických dat za co nejdelší období. Například při stejném ozelenění a typu konstrukce (10 cm třívrstvá konstrukce s bylinným porostem, sklonem 2 % a plochou 650 m<sup>2</sup>) s měnicími se daty o srážkách lze zjistit, že v Hannoveru zadrží tato zelená střecha 70 % srážek, v Berlíně 73 %, ve velmi suchém

<sup>2</sup> Pojmem souvrství se rozumí část skladby střechy nad hydroizolací. Jedná se tedy o ochrannou vrstvu, drenážní a ochrannou vrstvu, substrát a vegetaci.

---

regionu Lahr 81 %, v Leukirchu 48 % a Wuppertalu pouze 43 % ročního srážkového úhmu. V praxi se však lze následně setkat s mnohými problémy. Jedním z nich je množství vody, kterou jsou drenážní systémy, respektive kanalizace, schopny odvádět (Schiefler, 2005).

Řada studií se zabývala otázkou, zda sklon vegetační střechy ovlivní odtok. Byly ovšem získány protichůdné výsledky. Podle Getter et al. (2007) nebo Villarreal a Bengtsson (2005) se snižuje retenční schopnost střechy se stoupajícím sklonem. Naopak Liesecke (1999) a Schade (2000) došli k závěru, že sklon na tuto schopnost má vliv pouze zanedbatelný.

Berretta et al. (2014) se zabývali hydrologickým režimem zelených střech v průběhu srážkových epizod a vlivem použité vegetace a substrátu na tento režim. Pro výzkum bylo v roce 2009 sestaveno devět testovacích segmentů s plochou 3x1 m na střeše Centra Zelených střech Univerzity v Sheffieldu, UK. Od dubna 2010 byly nepřetržitě monitorovány. Segmenty obsahovaly kombinaci tří rozdílných substrátů (dvou komerčních – pro vřesy s levandulemi a pro rozchodníky a lehkého keramzitového) a tří extenzivních vegetačních úprav (směsi lučních květin, rozchodníků a bez vysázené vegetace). Hydrologický režim byl zkoumán během šesti vybraných srážkových epizod z let 2010 až 2012. Ukázalo se, že nejlepší retenční schopnost mají rozchodníky v porovnání se směsí lučních květin. To bylo nejvíce patrné při sledování těchto vegetačních krytů na keramzitovém substrátu. Nejméně tlumily odtok segmenty bez vegetace. Ze substrátů nejvíce retenci přispíval substrát pro vřes s levandulemi, dále pak pro rozchodníky a nejméně lehký s keramzitem. Dva komerční substráty v kombinaci s rozchodníky a lučními květinami při tom vykazovaly podobné retenční schopnosti. Tyto výsledky vykazovaly segmenty konzistentně v průběhu jednotlivých srážkových epizod. Na třech segmentech bez vegetace byl také zkoumán vliv vlastností substrátu na charakter odtoku. Tato závislost však nebyla prokázána. Stejný výsledek potvrdilo sledování třech segmentů osázených rozchodníky. Yio et al. (2013) přitom díky laboratorním testům prokázali, že podíl organické hmoty v půdě má vliv na zpoždění odtoku ze substrátu. Na charakter odtoku má také vliv počáteční vlhkost substrátu. Pokud je nasycení před srážkovou epizodou nízké, vykazuje při ní substrát lepší retenční schopnost. Počáteční vlhkost ovlivňuje zejména vegetace, která jí snižuje transpiraci a zároveň dokáže zachytit drobnější srážkové úhrny, které by jí zvyšovaly.

### 3. Materiály a metody

Následující pasáže v kapitolách 3.1., 3.2. a 3.3. jsou zpracovány s využitím údajů z Jelínková et al. (2015).

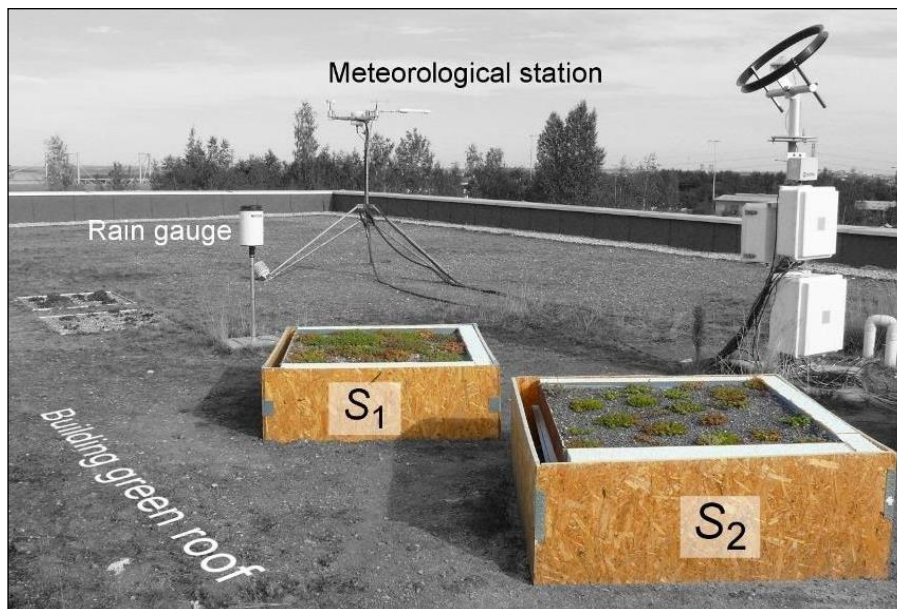
#### 3.1. Popis experimentu

Testované segmenty zelených střech (green roof test beds, zkráceně GREG) se nacházejí na extenzivní zelené střeše budovy Univerzitého centra energeticky efektivních budov (University Centre for Energy Efficient Buildings, UCEEB) v Buštěhradě (souřadnice 50°9.41797'N, 14°10.19195'E, nadmořská výška 355 m n. m.). V oblasti je mírné klima s průměrnými srážkami 500 mm/rok a průměrnou roční teplotou 8°C.

Obdélníková střecha budovy má plochu 941 m<sup>2</sup> a průměrný sklon 2 %. Nachází se ve výšce 10 metrů nad terénem. Navržena byla původně jako extenzivní. Její mělký substrát s průměrnou výškou 5 cm však nebyl pro vysetou travu dostačující a plocha se postupně stala nefunkční z hlediska požadavků na funkci zelené střechy.

První dva testovací segmenty (dále označované už jen jako S1 a S2), na kterých probíhaly veškeré výpočty, byly na střeše sestaveny v červnu roku 2014. Další dva segmenty byly instalovány na střechu koncem května 2015. Stanoviště (zobrazeno na Obr. 1) je vybaveno řadou přístrojů umožňujících automatické kontinuální monitorování meteorologických veličin (teploty vzduchu a půdy, rychlosti a směru větru, relativní vlhkosti vzduchu, čisté radiace, dešťové intenzity a odtokové výšky). Teplotní čidla jsou instalovány jak na segmentech GREG, tak na extenzivní zelené střeše budovy a přináší tak možnost porovnání výstupných dat mezi sebou při stejných klimatických podmínkách. Vegetace, použitá v testovacích lůžcích, je určena pro extenzivní zelené střechy, a proto není třeba žádné větší údržby (Jelínková et al., 2015).

Použitý srážkoměr je člunkový Young 52202 (R. M. Young Company) s kruhovou záchytnou plochou 200 cm<sup>2</sup> a jedním klapnutím o velikosti 0,1 mm. Vytápění a odolnost proti korozi umožňuje jeho celoroční použití. Jeho pozice je vidět na Obr. 1 (angl. Rain gauge).



Obr. 1: Fotografie střechy budovy UCEEB v Buštěhradě se dvěma testovacími segmenty S1 a S2, srážkoměrem, meteorologickou stanicí a přístrojem na měření radiace vpravo (převzato z Jelínková et al., 2016)

---

## 3.2. Možnosti segmentů

Konstrukce a vybavení segmentů umožňuje přesné měření odtoku vody ze systému. Dále nastavitelný sklon, použitelný při hodnocení vlivu sklonu a hloubky substrátu na zadržení dešťové vody a vývoji rostlinných druhů. Přesné váhy, umístěné pod nohama segmentu S2, umožňují měření jeho hmotnosti v čase. Všechny přístroje lze měřit celoročně, kromě odtokové výšky, kterou nelze měřit v zimě z důvodu možného poškození průtokoměru mrazem. Výsledky těchto testování se následně uplatní ve skutečném provozu. Také lze porovnat s vlastnostmi zelené střechy budovy, která je opatřena teplotními čidly v substrátu, v kačírku okolo atiky a ve výšce 23 cm a 200 cm nad střechou. K ovlivňování výsledků měření okolím by nemělo docházet, protože je konstrukce lůžek kvalitně izolována. Obecně slouží tento experiment k detailnímu průzkumu chování a výhod vegetačních střech (Jelínková et al., 2015).

## 3.3. Technický popis segmentů

### 3.3.1. Konstrukce segmentů

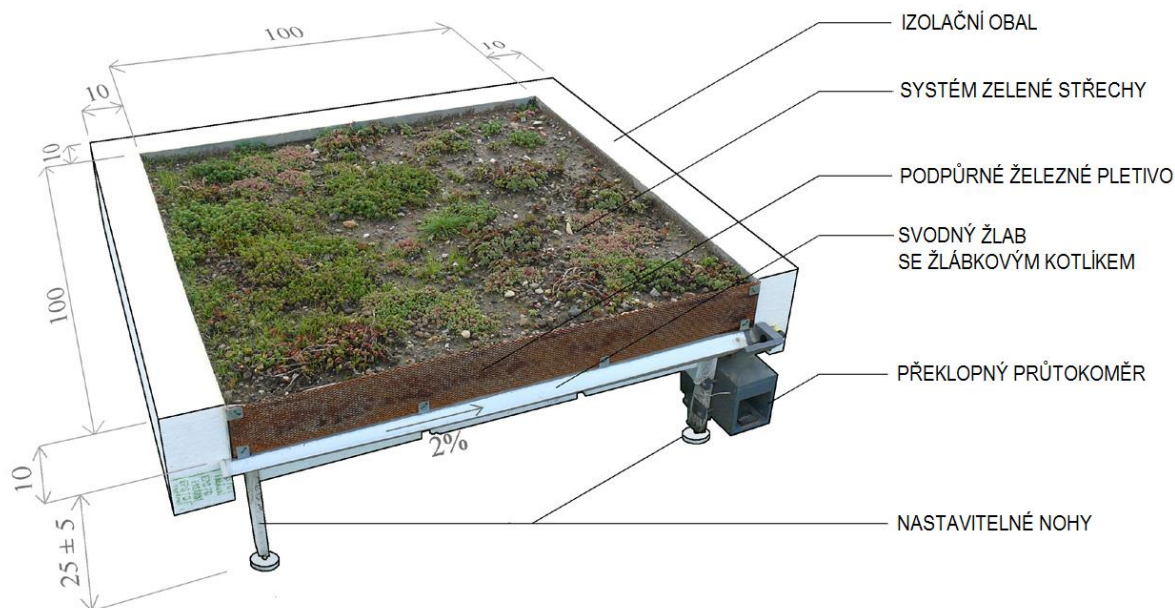
Kostru segmentů tvoří 10 mm tlustý pozinkovaný ocelový plech, zformovaný do otevřeného boxu s plochou 1000x1000 mm a hloubkou 100 mm. Box je nepropustný, vyztužený obdélníkovým ocelovým profilem zabraňujícím průhybu. Zesponu je podpírán čtyřmi nohama, vytvořenými ze závitových tyčí, umožňujících nastavení sklonu od 0 do 5°. Nohy jsou opatřeny vysoce přesnými vodotěsnými váhami LCMAD-100 (Omega Engineering Ltd., Manchester, UK). Izolace z extrudovaného pěnového polystyrenu silná 100 mm vytváří obal kolem celého boxu a chrání ho tak před nepříznivým vlivem okolního větru. Bez substrátu, ochranné vrstvy a rostlin má konstrukce 43 kg. Plně vybavený segment může mít hmotnost až 150 kg (Jelínková et al., 2015).

Dešťová voda je sbírána přes železné pleťivo do drenážního svodného žlabu, který vede přímo do překlopného průtokoměru. Přehledně to zobrazuje schéma na Obr. 2. Průtokoměr je chráněn plastovým krytem se dvěma otevřenými stranami pro volný odtok vody. Dokáže zaznamenat intenzitu odtoku 0,065 až 75 mm/hod. Jeho překlopné zařízení je tvořeno dvěma komorami, jejichž překlopení odpovídá odtokové výšce od velikosti 0,065 mm (65 ml). Byl sestaven v dílně Katedry hydrauliky a hydrologie na Fakultě stavební ČVUT.

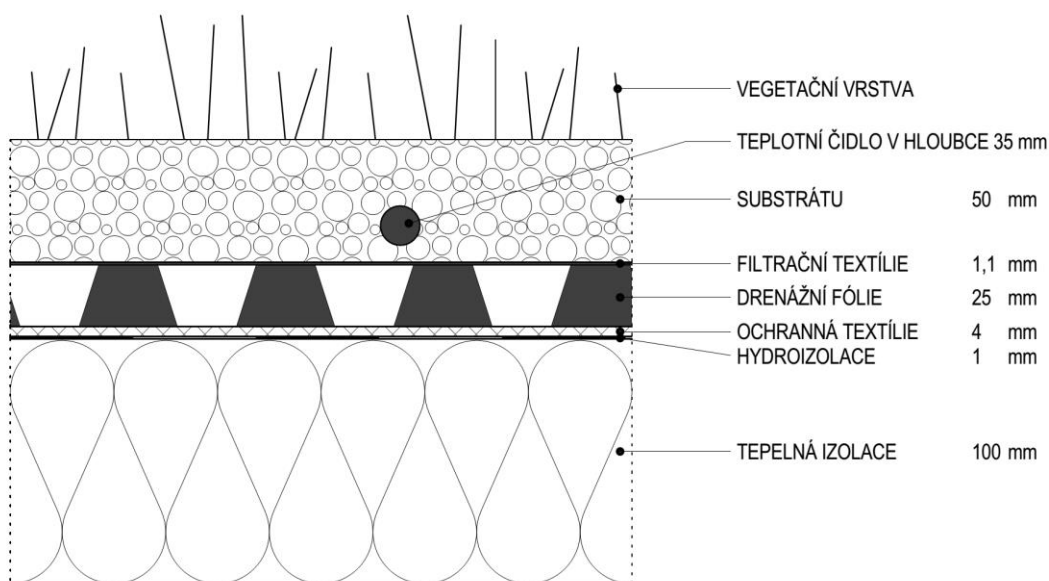
Přímo v substrátu obou segmentů v hloubce 35 mm je umístěno teplotní čidlo 107-L (Campbell Scientific Ltd., Shephed, UK). Další čidla jsou v substrátu zelené střechy budovy, v kačírku u atiky střechy a 23 a 200 cm nad střechou. Testovací týdenní měření prokázalo, že je teplota ve 23 cm nad vegetací střechy rozdílná v průměru o 0,13°C, individuálně až o 0,74°C než teplota ve 200 cm (Jelínková et al., 2015) a porost tedy na ní nemá velký vliv.

### 3.3.2. Průřez segmentem

Kostru a zároveň nepropustnou vrstvu testovacích lůžek tvoří pozinkovaný ocelový plech. Proti teplotním změnám chrání konstrukci izolační vrstva (extrudovaný pěnový polystyren 100 mm). Následuje ochranná vrstva, drenážní vrstva (nopová fólie), filtrační textilie, substrát (technosol nebo speciální substrát pro extenzivní zelené střechy, více viz kapitola 3.3.3.) a vegetační vrstva (rozchodníky a trvalky). Graficky znázorňuje všechny tyto vrstvy Obr. 3.



Obr. 2: Pohled na testovací segment zelené střechy se substrátem a rostlinami (upraveno z Jelínková et al., 2015)



Obr. 3: Průřez testovacím segmentem s popisem jednotlivých vrstev v měřítku 1:3

### 3.3.3. Použité substráty a vegetace

Jediný rozdíl mezi testovacími segmenty S1 a S2 je v použitém substrátu. V obou případech je jeho tloušťka 50 mm. Segment S1 však obsahuje ornici strženou z komunikace poblíž budovy UCEEB s lehkými anorganickými komponenty (keramzitem a rozdrčenými cihlami). Tento typ substrátu, označovaný jako technosol, je v posledních letech v ČR populární díky své nízké ceně. Jeho použití podporuje také absence legislativní regulace vlastností střešního substrátu. Analýzou jemných částí (menších než 2 mm) byl tento substrát zařazen mezi písčité hlíny.

U segmentu S2 byl použit lehký substrát Optigreen green roof extensive substrate Type E, vhodný na vícevrstvé extenzivní ploché zelené střechy (0-5°) a na jednovrstvé extenzivní šikmé zelené střechy (od 5°).

Substrát obsahuje expandovanou břidlici, lávu, pemzu, jíl, rozdrčené cihly a zelený odpadní kompost. Vzduchových pórů má 60-70 % z celkového objemu. Dle výrobce by jeho vodní kapacita měla být okolo 35 %. Je tedy vysoce propustný a má dobrou retenční schopnost. Analýzou jemných částic byl zařazen mezi hlinitý písek.

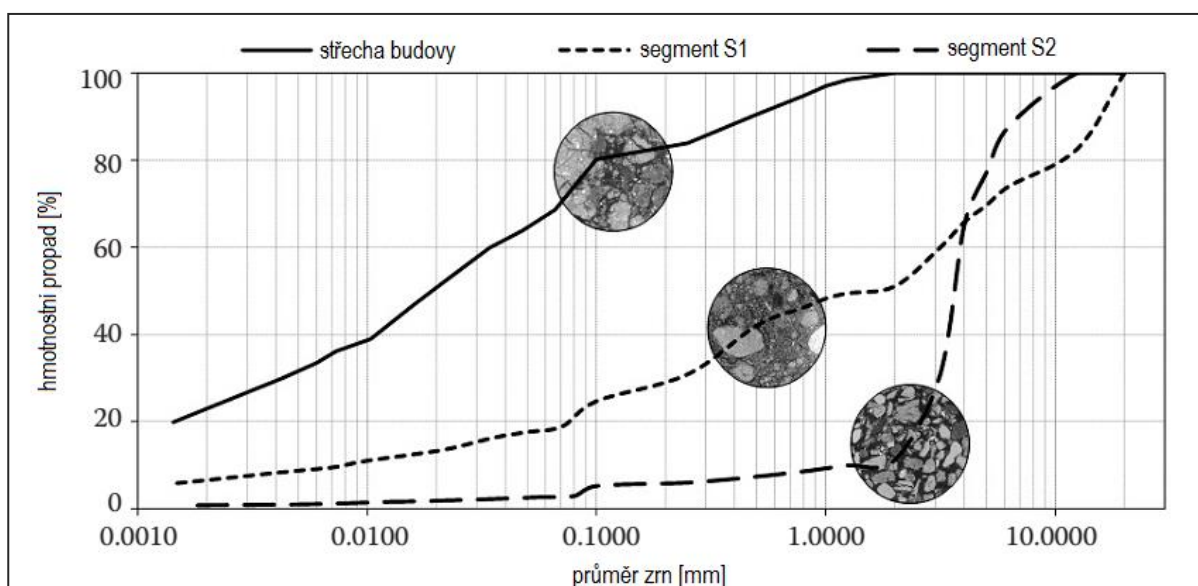
Na extenzivní zelené střeše budovy UCEEB byl použit podobný substrát jako v případě segmentu S1 (stržená ornice s drcenými cihlami a zeleným odpadním kompostem). Obsahuje velké množství malých částí a proto je náchylný k zanášení pórů a vytváření trhlin na povrchu. Zatřídít ho lze mezi hlíny.

Vybrané chemické a fyzikální vlastnosti jsou zobrazeny níže v Tab. 2.

Tab. 2: Fyzikální a chemické vlastnosti substrátů použitých ve dvou testovacích segmentech a na střeše budovy UCEEB (převzato z Jelínková et al., 2015)

Substrát	Množství organického uhlíku v pevné části [% C]	pH [-]	Elektrická vodivost [mS/m]	Obsah pevných částic [%]	Objemová hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]
Segment S1	2,30	8,5	15,40	51,2	1,15
Segment S2	0,73	8,5	4,93	78,5	0,77
Střeška budovy	3,99	8,4	18,80	68,5	1,00

Substrát použitý u segmentu S2 vykazuje zřetelně nižší elektrickou vodivost a množství organického uhlíku, obsahuje ale větší množství pevných částic. Také objemová hmotnost je nižší, což se u substrátu může projevit jeho zvýšenou pórovitostí, lepší aktivitou půdních mikroorganismů, rozsáhlejším prorůstáním kořeny, lepší dostupností živin pro rostliny a s tím související zvýšenou schopností infiltrace vody. Vyšší objemovou hmotnost substrátu S1 způsobuje mimo jiné i vyšší obsah jemných částí patrný z čar zrnitosti na Obr. 4.



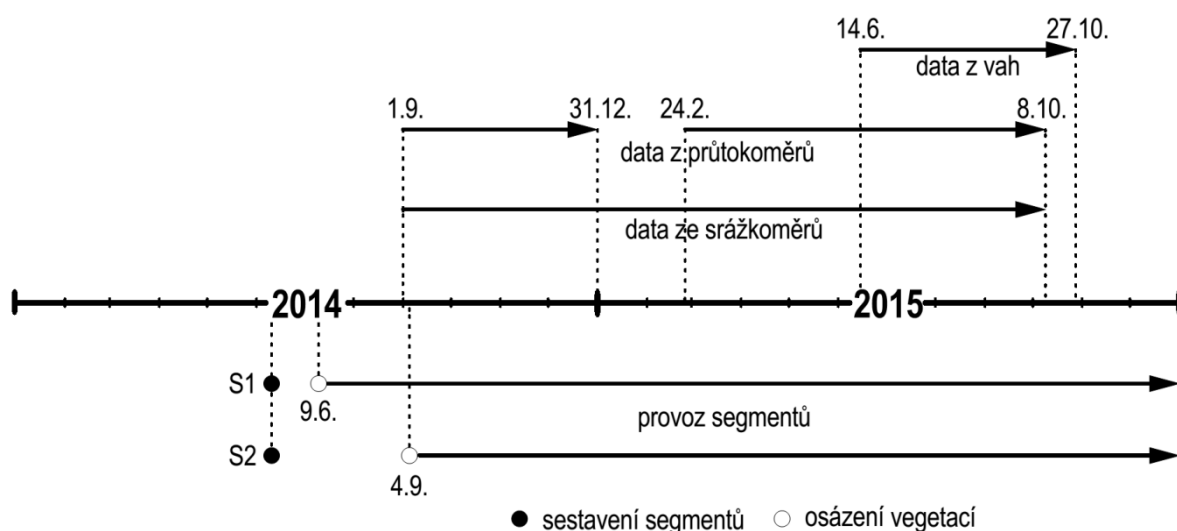
Obr. 4: Zrnitostní křivky pro substráty použité v testovacích segmentech a na střeše budovy UCEEB; detaily zobrazují typickou strukturu zeminy získanou přístrojem mikro CT (upraveno z Jelínková et al., 2015)

Testovací segment S1 byl osázen 9. července 2014 a S2 4. září 2014 směsí rozchodníků (*Sedum album*, *Sedum hybridum*, *Sedum spurium*, *Sedum acre*). Na střeše budovy byly vysazeny bylinné trvalky v září 2014.

Vývoj vegetačního krytu byl monitorován digitálním fotoaparátem. Tři měsíce po výsadbě byl segment S1 pokryt vegetací na 53 % povrchu půdy, povrch testovacího lůžka S2 porostla vegetace pouze z 8 % (viz Obr. 6).

### 3.4. Vyhodnocované období

K analýze byla použita data z testovacích segmentů S1 a S2. K dispozici byla minutová data ze srážkoměru ve výšce 1 m nad střechou budovy počínající 1. září 2014 00:00 končící 8. října 2015 13:30. Dále byla zpracována minutová data z průtokoměrů od 1. září 2014 00:00 do 31. prosince 2014 23:59 a od 24. února 2015 13:58 do 8. října 2015 14:00. Časová mezera je způsobena vypnutím překlopného průtokoměru na zimu, z důvodu jeho náchylnosti na porušení mrazem. Poslední byla pětiminutová data z vah pod nohami segmentu S2 od 14. června 2015 14:05 do 27. října 2015 15:25. Dostupnost dat zobrazuje Obr. 5. Minutové kroky byly pro usnadnění analýz sjednoceny na kroky pětiminutové. Vegetační kryt je od svého osázení v nepravidelných intervalech monitorovaný digitálním fotoaparátem. Z fotografií je následně vypočítáno, kolik procent z celkové plochy vegetace pokrývá (výpočet prováděli Jelínková et al. 2016, pro potřeby článku, který je v recenzním řízení v časopise *Journal of Soils and Sediments*).



Obr. 5: Časová osa zobrazující období, ze kterých byly získány výstupy přístrojů na střeše budovy UCEEB pro analýzu vývoje odtokových poměrů; dále zobrazuje datum sestavení a osázení segmentů S1 a S2

### 3.5. Charakteristiky epizod

Z období, popsaného v předešlé kapitole, byly vybrány srážkové epizody, během nichž je vhodné zkoumat odtokové vlastnosti segmentů. Pro každou epizodu byl stanoven čas začátku, čas konce, doba trvání, velikost srážkového úhrnu, odtoková výška a odtokový koeficient pro segment S1, odtoková výška a odtokový koeficient pro segment S2 a maximální intenzita srážky. Pro epizody s informacemi z vah segmentu S2 byla navíc stanovena váha na počátku a na konci epizod, rozdíl těchto vah a hydrologická bilance.

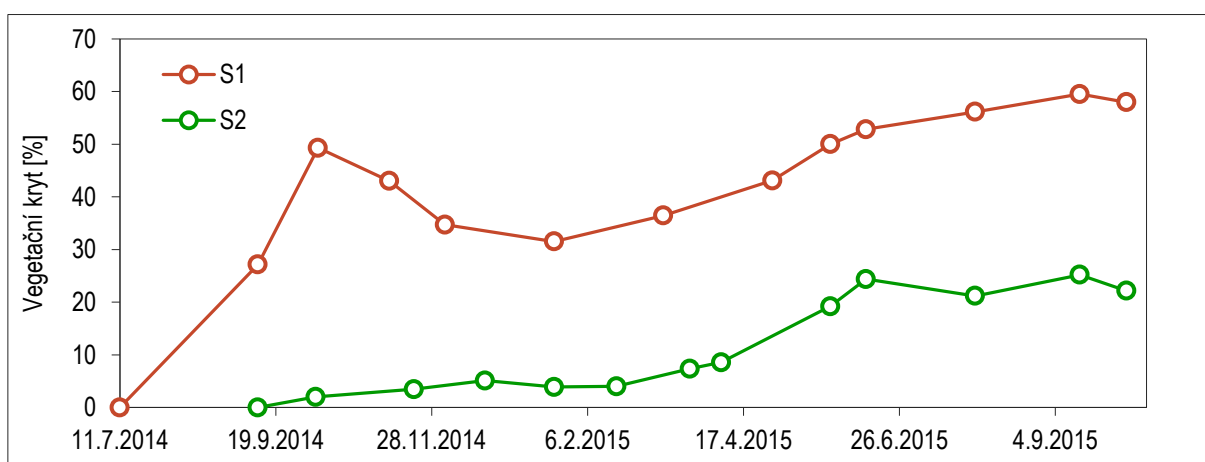
Pro všechny epizody bylo stanoveno také zpoždění  $t_{50}$  (Stovin et al., 2015), které vyjadřuje čas, za který odtoková výška dosáhne poloviny celkové srážkové výšky epizody. Většina epizod má menší odtokový koeficient než 50 % a proto nelze tuto charakteristiku vyhodnotit a dále zkoumat.



### 3.6. Vliv vegetace na odtokové koeficienty

Závislost odtokových koeficientů na procentuálním pokrytí plochy segmentu vegetací byla zkoumána několika způsoby. U vyhodnocovaných srážkových epizod byl zjištěn rozsah vegetačního krytu při jejím počátku, na kterém byla následně zkoumána závislost odtokových koeficientů. Ty však závisí na velikost srážky a nelze je při nízkém počtu vyhodnocovaných epizod zcela porovnat s rozsahem vegetačního krytu.

Jako vhodnější se ukázala metoda, při které bylo procento pokrytí vegetací porovnáno s odtokovými koeficienty z období začínajících 25 dní před focením (ze kterého je procento pokryvu vyhodnoceno) a končícím 25 dní po něm. Metoda je poměrně přehledná a netrpí nepravidelnými intervaly mezi pořizováním snímků. Vývoj vegetace znázorňuje Obr. 6, na kterém je patrné, že byl segment S1 osázen o 2 měsíce dříve než segment S2. Zeleň se na segmentu S1 začala rozvíjet rychleji s mírným úpadkem v zimě. Od ledna do října 2015 se její procentuální zastoupení zvýšilo ze 31 % na 58 %, zatímco u segmentu S2 se rozvinula pouze ze 4 % na 22 %.



Obr. 6: Vývoj vegetačního krytu v testovacích segmentech S1 a S2 na střeše budovy UCEEB v letech 2014 a 2015 (upraveno z Jelínková et al., 2016)

### 3.7. Hydrologická bilance

Pro další analýzy byla použita rovnice hydrologické bilance, v diskrétním tvaru:

$$\Delta S = I - Q - E \quad (1)$$

kde  $\Delta S$  je změna zásoby vody za bilancované období [mm],  $I$  srážková výška [mm],  $Q$  odtoková výška [mm] a  $E$  výparná výška [mm].  $E$  lze však v tomto případě zanedbat, protože byla rovnice aplikována na jednotlivé srážkové epizody, během kterých jsou hlavní hnací mechanismy evapotranspirace minimální. Při použití dat ze srážkoměru a průtokoměru zůstává v rovnici neznámá zásoba vody. Pokud jsou použita data z vah segmentu S2 v roce 2015, lze dopočítat všechny členy bilance – bilance se uzavře. Váhy měří průběžně hmotnost celého segmentu včetně konstrukce a umožňují tedy přesnější určení hydrologické bilance. Změna hmotnosti segmentu o 1 kg je shodná s hmotností vodního sloupce s výškou 1 mm, na ploše 1 x 1 m. Po úpravě rovnice (1) do tvaru:

$$0 = I - Q - \Delta S \quad (2)$$

Ize zhodnotit uzavření bilance. Hodnoty srážkové výšky  $I$  jsou získány ze srážkoměru, odtokové výšky  $Q$  z průtokoměru a  $\Delta S$  z vážení, při použití vztahu:

$$\Delta S = S_1 - S_0 \quad (3)$$

kde  $S_1$  je váha segmentu na konci a  $S_0$  na začátku časového kroku. Platnost rovnice (2) lze ověřit v libovolném okamžiku srážkové epizody (při časových proměnných  $I_t$ ,  $Q_t$  a  $\Delta S_t$ , s předpokladem, že  $S_0$  je hmotnost segmentu na začátku epizody) nebo je možné sledovat její vývoj v čase.

Pro usnadnění analýzy hydrologické bilance segmentů bylo vypočítáno relativní nasycení zeminy v segmentu. Nejprve byla hmotnost segmentu 74,81 kg ze dne 19. července 2015 15:25 stanovena jako hmotnost segmentu se zcela vysušenou půdou. Oprávněnost tohoto předpokladu podporuje skutečnost, že pět předešlých dnů nebyly zaznamenány žádné srážky a zároveň byly naměřeny vysoké teploty – průměrně 25°C s maximem 36°C. Naopak hmotnost 88,61 kg z 18. srpna 2015 14:15 byla z měřeného období absolutně nejvyšší a proto je v této práci zjednodušeně považována za váhu segmentu se zcela nasycenou půdou. V tento den končila srážková epizoda trvající 52 hodin s celkovým srážkovým úhrnem 52 mm. Minimální hmotnost tedy odpovídá relativnímu nasycení 0 %, maximální hmotnost 100 %.

### 3.8. Model kaskády lineárních rezervoárů

Tento model je založen na principu hydrologické bilance. Odtok z každého výše položeného rezervoáru je přítokem do dalšího rezervoáru. Kaskádu lineárních rezervoárů používá okamžitý jednotkový hydrogram navržený Nashem v roce 1957 (Stanescu et al., 2006).

Dle Kasmin et al. (2010) lze modelovat odtok pomocí konceptu kaskády lineárních rezervoárů vyjádřeného rovnicí:

$$h_t = h_{t-1} + Qin_t \Delta t - Qout_t \Delta t \quad (4)$$

kde  $h_t$  reprezentuje momentální zásobu vody v testovacím segmentu [mm],  $h_{t-1}$  zásobu vody v předchozím kroku [mm],  $Qin_t$  a  $Qout_t$  přítok, respektive odtok vody ze substrátu [mm/5min] a  $\Delta t$  délku časového kroku [5min]. Výstupy z přístrojů jsou v minutových krocích. V této práci byly sjednoceny do pětiminutových kroků, proto jsou uvažovány i v rovnici.  $Qout_t$  je dáno ze vztahu:

$$Qout_t = k(h_{t-1})^n \quad (5)$$

ve kterém je  $k$  časový koeficient lineárních rezervoárů [ $\text{mm}^{(1-n)}/\text{m}$ ] a  $n$  počet lineárních rezervoárů v kaskádě. Stovin et al. (2015) doporučuje pro  $k$  zvolit hodnotu 0,03 (při pětiminutových krocích je vhodné zvolit  $k$  0,15) a pro  $n$  2,0. Obecně počáteční volba  $k$  a  $n$  závisí na použitém substrátu, vegetaci a drenážní vrstvě.

Pro posouzení přesnosti modelu byla zvolena metoda nejmenších čtverců, podle které byla za pomoci vzorce:

$$e_i = [C_{Qoutt} - C_{Qt}]^2 \quad (6)$$

spočítána pro každý časový krok velikost kvadrátu odchylky  $e_i$  [ $\text{mm}^2$ ].  $C_{Qt}$  je v tomto případě skutečná hodnota kumulativního odtoku v čase  $t$  [mm] a  $C_{Qoutt}$  je vypočítaný kumulativní odtok [mm] v čase  $t$ . Při posuzování modelu je tedy třeba znát průběh skutečného odtoku. Součtem všech těchto odchylek je získána suma kvadrátů

---

odchylek. Čím více konverguje modelovaný odtok ke skutečnému, tím více se tato suma blíží nule. Pro získání nejvhodnějších parametrů modelu kaskády lineárních rezervoárů je tedy třeba tuto hodnotu minimalizovat.

Porovnávat parametry lineárních rezervoárů různých srážkových epizod lze na základě sumy kvadrátů odchylek. Ty jsou však ovlivněny počtem časových kroků. Vhodnější srovnání je na základě hodnot zobecněné směrodatné odchylky RMSE (root mean square error), která je normalizovaná (Chai et al., 2014):

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

kde je  $e_i$  kvadrát odchylky v  $i$ -tém časovém kroku a  $n$  počet časových kroků. Tím jsou zobecněny sumy kvadrátů odchylek a lze je lépe porovnat mezi sebou.

Popsaný model lze použít k predikci odtoku dešťové vody z jednoduchých systémů.

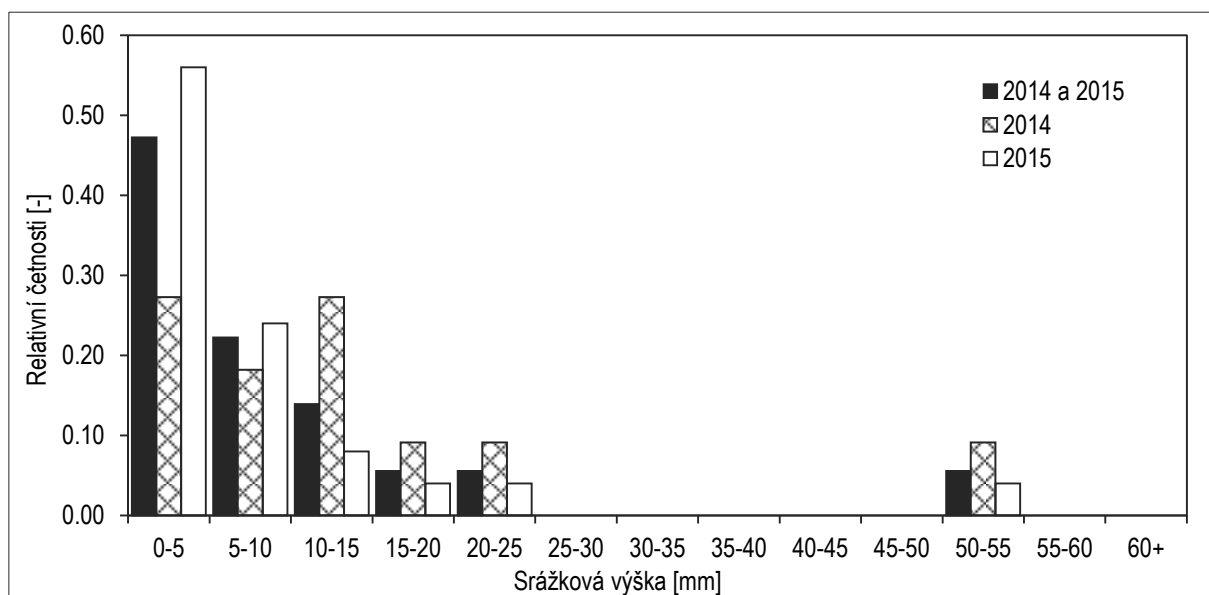
## 4. Výsledky a diskuze

### 4.1. Vyhodnocení charakteristik epizod

Třicet šest vybraných srážkových epizod z vegetačních sezón 2014 a 2015 bylo rozděleno podle velikosti srážkového úhrnu do 13 tříd po 5 mm. U každé z nich byly zjištěny údaje popsané v kapitole 3.5. Následující kapitoly představují statistické zhodnocení využívající tyto údaje pro segment S1 i vážený segment S2.

#### 4.1.1. Relativní četnost srážek

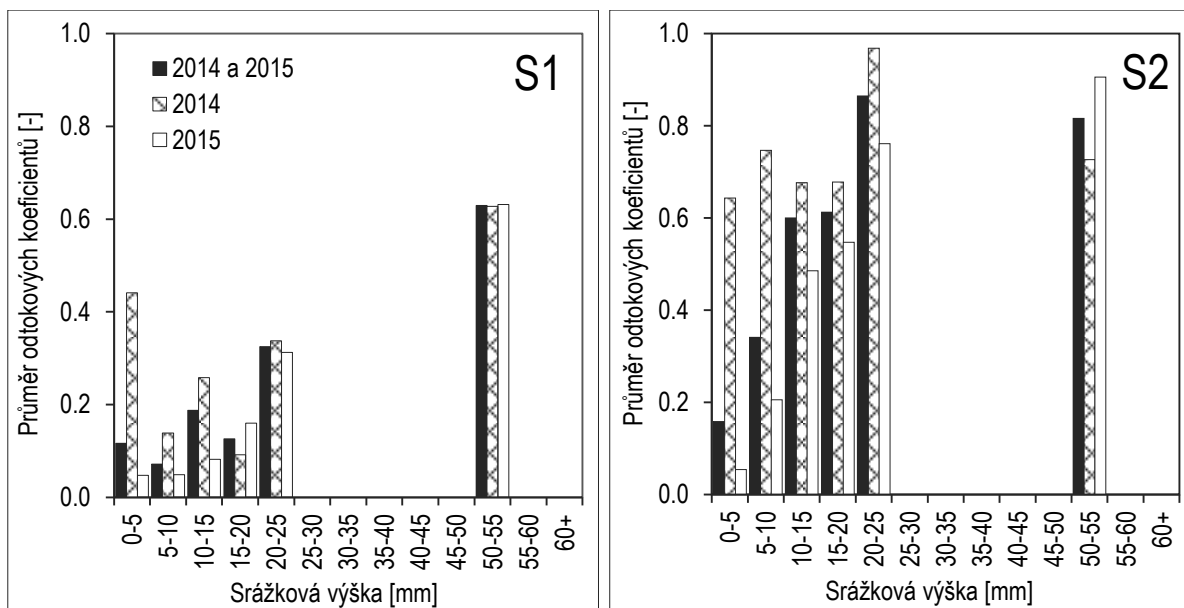
Pro dané období byl sestaven histogram relativních četností patrný z Obr. 7. Na grafu je vidět, že v letech 2014 a 2015 chyběly epizody se středními a velkými srážkovými úhrny, tj. 25 až 50 mm. Chování těchto epizod tedy nebylo možno zkoumat. Menší epizody jsou dostatečně zastoupeny, nicméně je třeba počítat s tím, že jejich chování je odlišné od větších epizod a mohou analýzy zkreslovat.



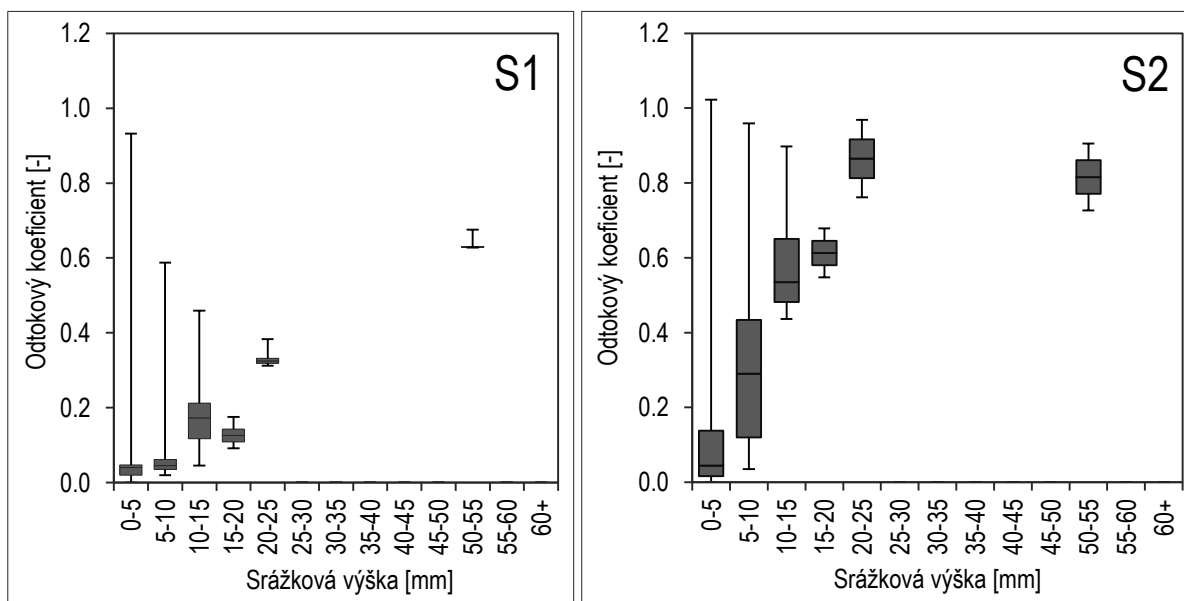
Obr. 7: Histogram relativních četností srážkových epizod v obou vegetačních sezónách 2014 a 2015 dohromady i odděleně, pro každý rok zvlášť

#### 4.1.2. Průměry odtokových koeficientů

V každé třídě byly zprůměrovány vypočtené hodnoty odtokových koeficientů jednotlivých epizod. Z Obr. 8 je patrná závislost odtokového koeficientu na úhrnné srážkové výšce epizody. S narůstajícím srážkovým úhrnem stoupá a i průměrný objem vody, která ze segmentu odteče, v poměru vůči němu. Tuto skutečnost lze pozorovat zejména v roce 2015. V roce 2014 není tato závislost dobře patrná z důvodu menšího počtu epizod a větší variability odtokových koeficientů způsobené pravděpodobně krátkou dobou od stavby segmentů a rychlým vývojem vegetace. Obrázky také ukazují, že ze segmentu S2 ve všech třídách průměrně odteče větší množství vody než z S1, jehož substrát je jemnozrnější a pokrytí vegetací rozsáhlejší. Dokáže tak zadržet více vody.



Obr. 8: Průměry odtokových koeficientů segmentů S1 (vlevo) a S2 (vpravo) v jednotlivých třídách srážkové výšky, dohromady i zvlášť pro vegetační sezóny v letech 2014 a 2015



Obr. 9: Krabicový diagram pro segmenty S1 (vlevo) a S2 (vpravo), kde je střední část ohraničena kvartily a mezi nimi se nachází linie vymezující medián; linie vycházející ze střední části ohraničuje minimum a maximum datového souboru

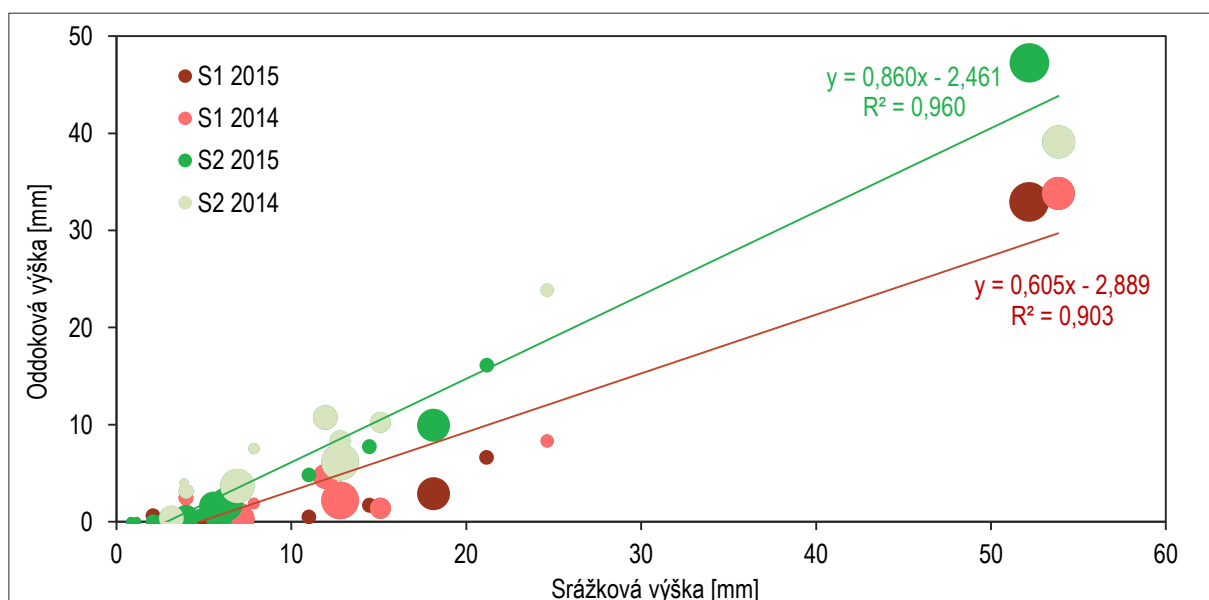
#### 4.1.3. Statistické ukazatele

Pro každou třídu byl také stanoven medián, 1. kvartil, 3. kvartil, minimum a maximum. Všechny tyto ukazatele zobrazuje Obr. 9 pomocí krabicových diagramů, kde jsou střední části ohraničeny 1. kvartilem, 3. kvartilem a mezi nimi se nachází linie, vymezující medián. Linie vycházející ze střední části vyjadřují maximum a minimum datového souboru. Do analýzy jsou zahrnuty srážky z celého sledovaného období (z roku 2014 i 2015). Vhodné k vyhodnocení jsou ovšem pouze první tři třídy (0-5 mm, 5-10 mm a 10-15 mm), které obsahují 5 a více epizod. Ve zbývajících třídách může být zobrazení zkráceno malým počtem epizod.

Z grafů je zřejmá závislost rozptylu a velikosti odtokových koeficientů na srážkové výšce. Rozptyl u segmentu S2 je větší v každé třídě než u S1, což značí, že odtok probíhá náhodněji. V obou případech lze mezi třídami velikosti srážkového úhrnu pozorovat stoupající trend. Meziročně klesl rozptyl odtokových koeficientů v obou případech, zřejmě z důvodu sednutí substrátu a ustálení retenčních schopností substrátu. Došlo také ke zmenšení boxů, které indikují nejpravděpodobnější možný výskyt. Pro přesnější vyhodnocení retenční schopnosti půdy by bylo vhodné zkoumat odtok za delší období než pouze 2 roky.

#### 4.1.4. Závislost odtokových koeficientů na vlastnostech epizod

U epizod byla také sledována závislost odtokového koeficientu na srážkové výšce. Obr. 10 tuto závislost zobrazuje pro oba segmenty v letech 2014 a 2015. Regresní přímka proložená datovou sadou má v obou případech vysokou hodnotu koeficientu determinace  $R^2$  (90,3 % pro S1 a 96,0 % pro S2). Z toho vyplývá, že je množství odtoku lineárně závislé na množství srážkové vody. Strmější sklon regresní přímky u segmentu S2 značí, stejně jako předešlá analýza, že z něho odečte více vody v poměru vůči velikosti srážky. Meziročně byly sledovány minimální změny této závislosti.



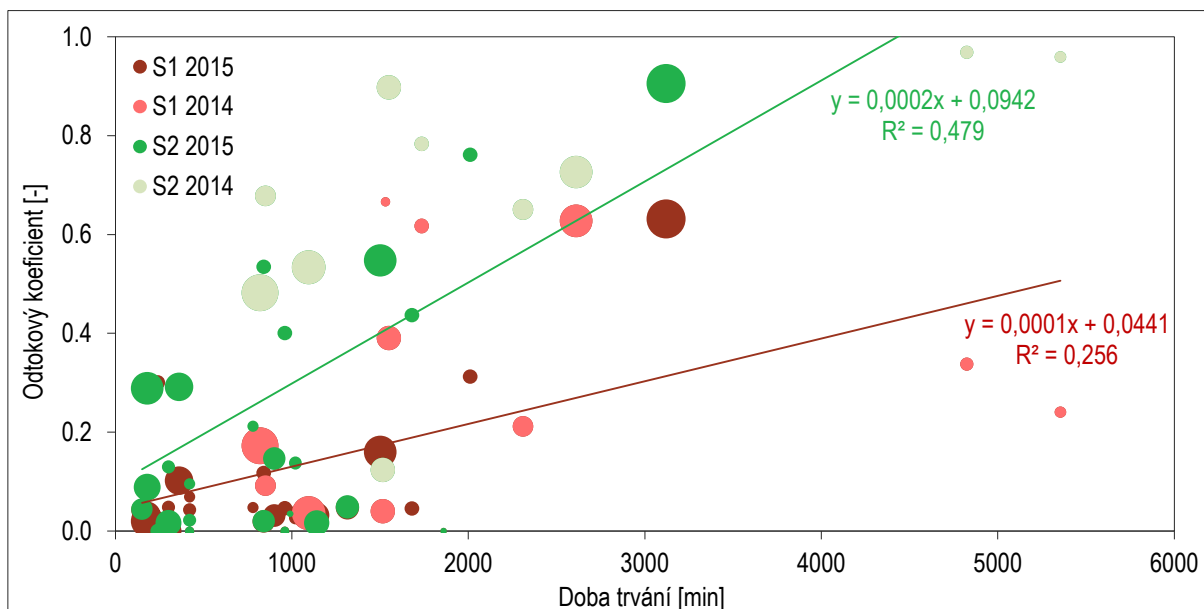
Obr. 10: Závislost odtokového koeficientu obou segmentů na srážkové výšce ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; velikost bubliny vyjadřuje intenzitu srážky od 0,1 do 3,6 mm/5min

Obr. 11 zobrazuje závislost odtokových koeficientů jednotlivých srážko-odtokových epizod na jejich době trvání. Závislost je zde velmi slabá. Koeficient determinace  $R^2$  dosahuje nízkých hodnot (25,6 % pro S1 a 47,9 % pro S2). S dostupnou datovou sadou nelze zjistit typ závislosti mezi dobou trvání srážek a odtokovými koeficienty. Ty jsou závislé především na velikosti úhrnu a charakteru srážky.

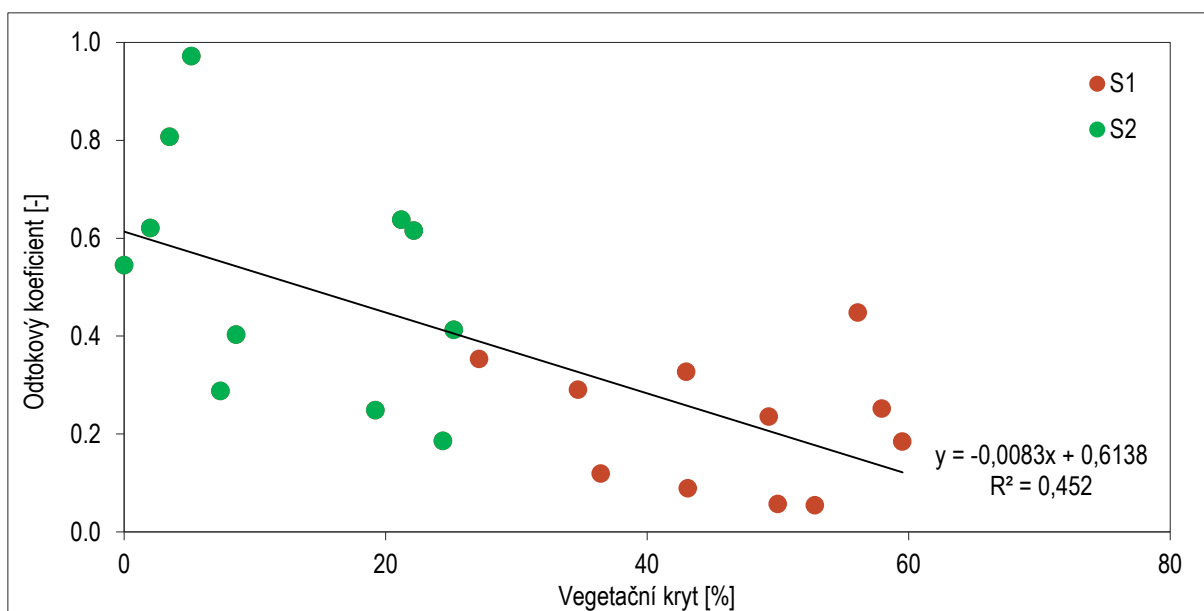
## 4.2. Vliv vegetace na odtokové koeficienty

Ke každému měření vegetačního krytu z vegetačních sezón 2014 a 2015 byl přiřazen odtokový koeficient z období začínajícího 25 dní před měřením a končícího 25 dní po něm. Získané hodnoty byly vyneseny do Obr. 12 pro oba segmenty. Na obrázku je vidět, že v obou případech vykazují klesající trend. Rozvíjející se vegetace dokáže zadržet více vody a snížit celkový odtok ze systému. U segmentu S2 se vegetace rozvíjela pomaleji a proto jsou jeho odtokové koeficienty vyšší. Hodnoty procentuálního vegetačního pokryvu se v grafu pro oba

segmenty neprolínají. Nelze tedy určit, do jaké míry jsou odtokové koeficienty závislé na vegetaci a do jaké míry na použitém substrátu. Na něm však jistě závisí rychlost porůstání segmentu vegetací. Přestože má substrát v segmentu S2 vyšší pórovitost, která mu umožňuje snadnější prorůstání kořeny a zvyšuje tak dostupnost živin pro rostliny, obsahuje současně čtyřikrát méně organického uhlíku než substrát v segmentu S1. Ten je velmi důležitým prvkem pro rozvoj vegetace (průběh rozvoje zobrazuje Obr. 6).



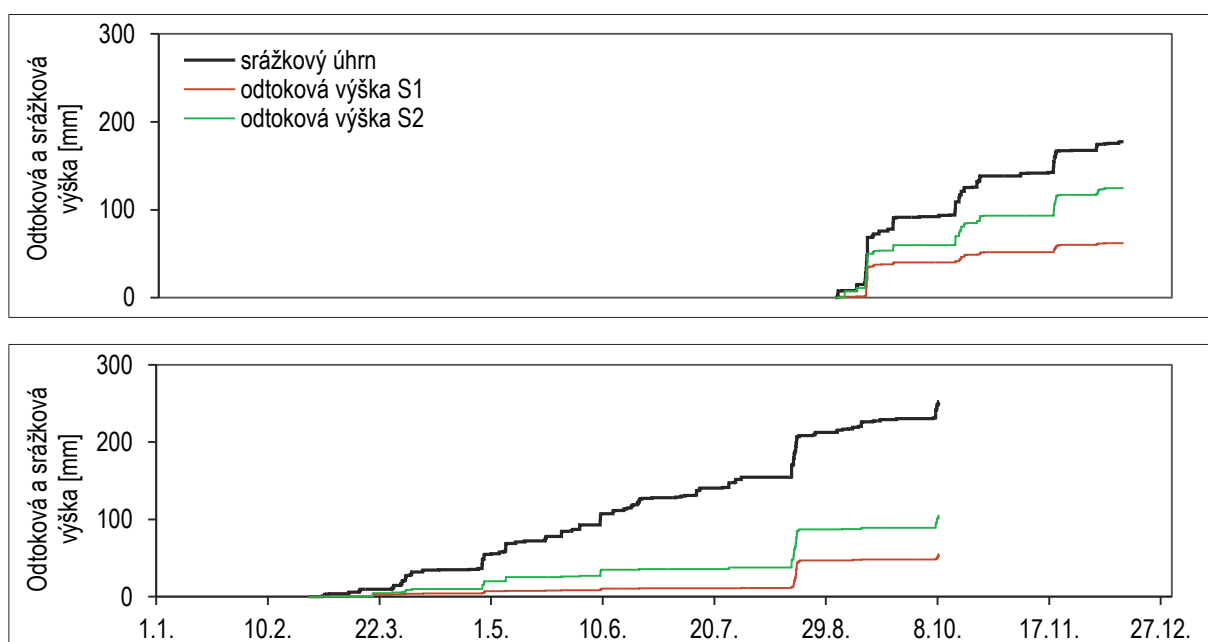
Obr. 11: Závislost odtokového koeficientu obou segmentů na době trvání srážky ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; velikost bubliny vyjadřuje intenzitu srážky od 0,1 mm/5min



Obr. 12: Závislost odtokových koeficientů na vegetačním krytu segmentů S1 a S2 ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; regresní přímka je proložena oběma datovými sadami

### 4.3. Celkové odtokové koeficienty v roce 2014 a 2015

Kumulativní srážkové a odtokové výšky v letech 2014 a 2015 pro oba segmenty ukazuje Obr. 13. Počítány byly pouze ve vegetační sezóně<sup>3</sup>, a proto nezahrnují celý rok. Odtokové výšky měřené v testovacích segmentech se liší, protože u nich byl použit jiný substrát. Schopnost propouštět vodu je výrazně větší u segmentu S2, který má pórovitější půdu. Navíc se u tohoto segmentu z důvodu posunutého vysazení vegetace o dva měsíce a jejího pozvolnějšiho rozvíjení začaly projevovat její retenční schopnosti až později.



Obr. 13: Kumulace srážkové výšky a odtokové výšky pro oba segmenty ve vegetačních sezónách 2014 (nahoře) a 2015 (dole)

Výsledné hodnoty odtokových a srážkových výšek jsou v Tab. 3. Odtoková výška segmentu S1 tvořila v roce 2014 35,0 % srážkové výšky. Naproti tomu v roce 2015 to bylo 21,7 %. Odtokový součinitel se tedy snížil o 62,1 %. Podobně u segmentu S2, ze kterého v roce 2014 odteklo 70,3 % napršené vody a v roce 2015 41,6 %. Došlo tedy k podobnému poklesu a to 59,2 %. Větší zadržení vody v roce 2015 bylo způsobeno u obou segmentů částečně rozšířením vegetačního pokryvu, částečně rozdílnými klimatickými podmínkami a částečně změnou struktury substrátu.

Tab. 3: Srážkové a odtokové výšky ve vegetačních sezónách 2014 a 2015 s odtokovými koeficienty

	Srážkový úhm [mm]	Odtok z S1 [mm]	Odtokový koeficient S1 [-]	Odtok z S2 [mm]	Odtokový koeficient S2 [-]
2014	177,36	62,03	0,350	124,65	0,703
2015	252,37	54,79	0,217	105,05	0,416
Meziroční změna [%]			- 62,1		- 59,2

<sup>3</sup> V roce 2014 začíná vegetační sezóna v září, kdy byly segmenty osázeny. V roce 2015 je naopak ukončena v říjnu, protože další data nejsou k dispozici. V obou případech je vynecháno zimní období, protože tuhé srážky nelze tímto způsobem jednoznačně hodnotit.



#### 4.4. Výpočet hydrologické bilance

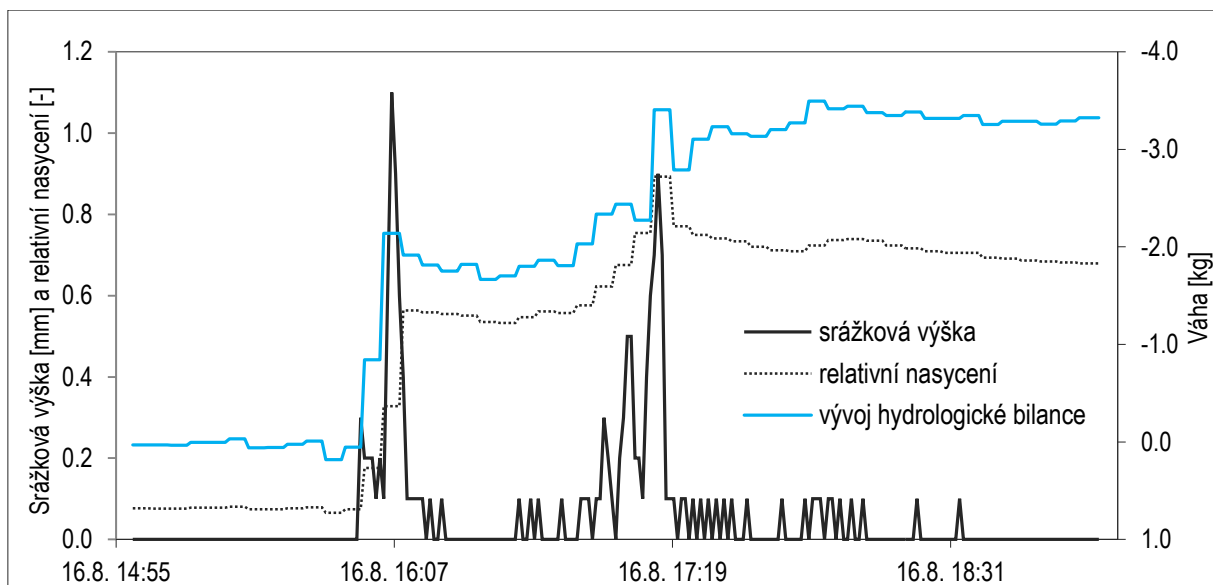
Rovnice (2) z kapitoly 3.7. byla aplikována na 15 srážkoodtokových epizod váženého testovacího segmentu S2 ve vegetační sezóně 2015 (od 14. června do 27. října). Za hodnoty srážkové výšky  $I$  a odtokové výšky  $Q$  byla dosazena celková srážková, respektive odtoková výška epizody. Dle rovnice (3) z kapitoly 3.7. byla spočítána hodnota  $\Delta S$ , kde  $S_0$  je hmotnost segmentu na začátku a  $S_t$  na konci časového kroku. Předpokládané rovnosti však nebylo dosaženo u 14 epizod ani po započítání odhadnuté chyby měření 5 % z celkového srážkového úhrnu epizody. Další analýzou zjištěno, že velikost nerovnosti závisí na velikosti a charakteru srážky.

Vývoj bilanční rovnice lze také počítat v průběhu srážky. Příklad takového vývoje ukazuje Obr. 14 s částí srážkové epizody z 16. srpna 2015, spolu s průběhem relativního nasycení (popsaného v kapitole 3.7.). K největšímu vychýlení bilanční rovnice od očekávané hodnoty 0 dochází v momentech největší intenzity srážky. Do záporných hodnot se bilance dostává, protože příjem vody v daném okamžiku ( $I-Q_t$ ) je menší než změna zásoby vypočítaná pomocí vah ( $\Delta S_t$ ) v daném okamžiku. Relativní vlhkost substrátu dopomáhá k lepší představě o možnosti segmentu pojmout další vodu.

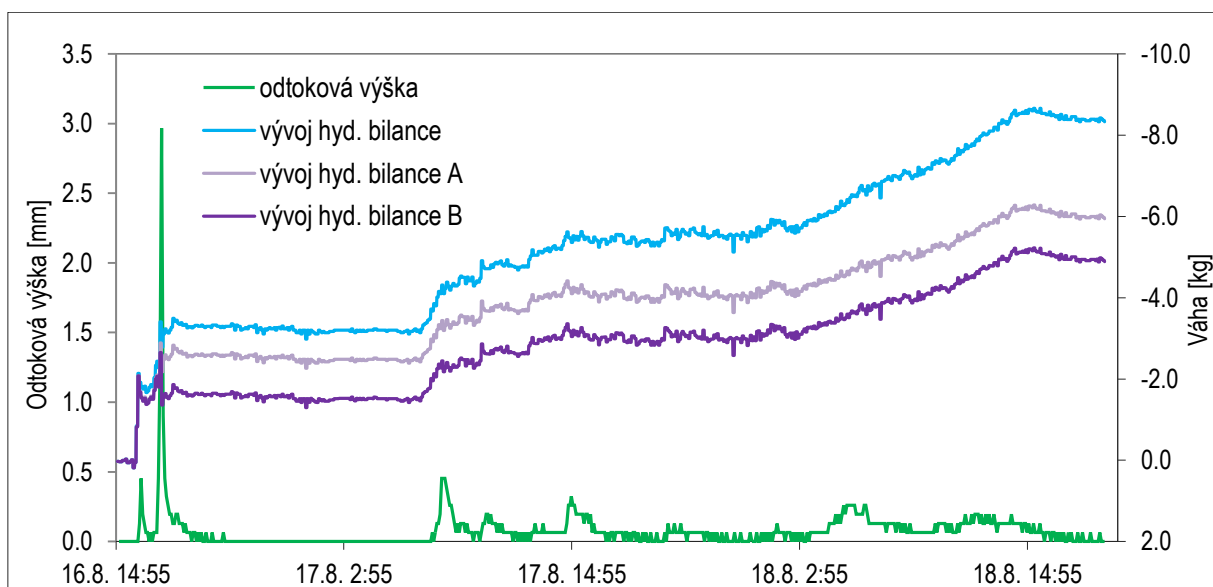
Jako jedna z možných příčin bylo zkoumáno mechanické zatížení, působící na konstrukci segmentu vlivem větru nebo dynamické síly srážky. Závislost na takovémto zatížení však nebyla prokázána. Při výpočtu bilance by se po určitém čase tento efekt kompenzoval zpětným odlehčením a jeho celkový vliv by byl na konci epizody vyrovnán a tudíž v delších časových krocích zanedbatelný.

Další zkoumanou příčinou vychýlení výsledku bilanční rovnice od očekávané hodnoty bylo nezastřešení svodného žlabu (Obr. 2), odvádějícího vodu z testovacího segmentu do průtokoměru. Jeho nezakrytá vrchní část zvětšuje plochu, na kterou dopadají srážky. Skutečně segmentem zachycená srážková výška je tak větší, než srážková výška dopadající na ozeleněnou plochu segmentu 1x1 m. U segmentu S2 je plocha svodného žlabu 480,28 cm<sup>2</sup>. Po připočtení srážek dopadajících do žlabu došlo k navýšení celkové hodnoty  $I$  o 4,76 %. Tím došlo ke zmenšení chyby ve vypočtené hydrologické bilanci. U srážkové epizody začínající 16. srpna 2015 je toto zlepšení například z původních -8,3 kg na po opravě aktuálních -5,9 kg. Průběh bilance se započítaným vlivem odtokového žlabu zobrazuje ve srovnání s neupravenou bilancí Obr. 15.

Jako další z možných řešení bylo zahrnutí dynamické kalibrace průtokoměru. U překlopného mechanismu průtokoměru dochází při vyšších intenzitách deště (nad 5 mm/hod) k dynamickému pohybu, který způsobí překlopení nádoby před jejím úplným naplněním. Tak je zaznamenáno více překlopení s menší odtokovou výškou, než je uváděných 0,065 mm a dochází k nevhodnému zvyšování hodnoty  $Q$  v bilanční rovnici. S narůstající intenzitou deště roste také rychlost překlápění a s ní velikost vznikající nepřesnosti. Dle Humphreyho et al. (1997) byla přibližně stanovena velikost této chyby. Použitou dynamickou kalibraci zobrazuje Tab. 4. Zlepšení vývoje bilance zobrazuje Obr. 15. Oproti předchozí opravě, která zmenšuje nepřesnost kdykoli, kdy jsou měřeny dopadající srážky, má vliv tato oprava na bilanční rovnici pouze, když je průtokoměrem zaznamenáván odtok větší než 2 mm/hod. Za použití obou oprav byla vypočtená bilance u zmiňované epizody z 16. srpna 2015 zredukována z původních -8,3 kg na upravených -4,9 kg.



Obr. 14: Srážková výška, naměřená 16. srpna 2015, spolu s relativním nasycením substrátu na hlavní svislé ose; vývoj hydrologické bilance vypočítané z bilanční rovnice (2) na vedlejší svislé ose



Obr. 15: Odtoková výška, naměřená při srážkové epizodě začínající 16. srpna a končící 18. srpna 2015 na hlavní svislé ose; vývoj hydrologické bilance bez oprav (modrá čára), se započítanými srážkami dopadajícími do svodného žlabu (světle fialová čára A) a se započítanými žlabem a dynamickou kalibrací (tmavě fialová čára B)

Tab. 4: Dynamická kalibrace použitá na opravu hydrologické bilance (sestavena na základě Humprey et al. 1997)

Intenzita deště [mm/hod]	Počet klapnutí [-]	Velikost chyby [%]
0-5	<2	0
5-12	2-3	10
12-16	3-4	13
16-24	4-6	17
>24	>6	20

## 4.5. Model kaskády lineárních rezervoárů

Pro 7 vybraných srážkových epizod byl vypočten odtok z testovacího lůžka S2 dle modelu popsaného v kapitole 3.8. Pro počet kaskád lineárního rezervoáru  $n$  byla zvolena výchozí hodnota 2,0 a pro koeficient lineárních rezervoárů  $k$  byla zvolena hodnota 0,15. Obě podle doporučení Stovin et al. (2015) pro pětiminutové časové kroky. Přesnost vypočteného kumulativního odtoku byla porovnána se skutečným průběhem kumulativního odtoku pomocí zobecněné směrodatné odchylky. Hledány byly optimální hodnoty proměnných parametrů  $k$  a  $n$ . V některých případech došlo během optimalizace ke snížení hodnoty cílové funkce až o 95 %. Tak byly získány optimální hodnoty parametrů  $k$  a  $n$  pro jednotlivé srážky, které jsou přehledně vypsány v Tab. 5. V tabulce lze nalézt kromě krátké charakteristiky (čas začátku, srážkový úhrn a maximální intenzitu) také hodnotu RMSE pro počáteční odhad koeficientů modelu. Počet kaskád lineárních rezervoárů  $n$  by měl teoreticky být celočíselný. Při optimalizaci byla ovšem hledána co nejpřesnější hodnota bez ohledu na toto teoretické omezení, parametr byl tudíž uvažován jako zcela empirický. Dle Tab. 5 se zdá, že intenzita srážky nemá na výsledné RMSE vliv.

Tab. 5: Srážkové epizody využité k výpočtu odtoku ze segmentu S2 z vegetačních sezón v letech 2014 a 2015 se stručnou charakteristikou (čas začátku, srážkový úhrn a maximální intenzita), optimalizovanými koeficienty  $k$  a  $n$  s ukazatelem přesnosti RMSE a ukazatelem RMSE s doporučenými koeficienty

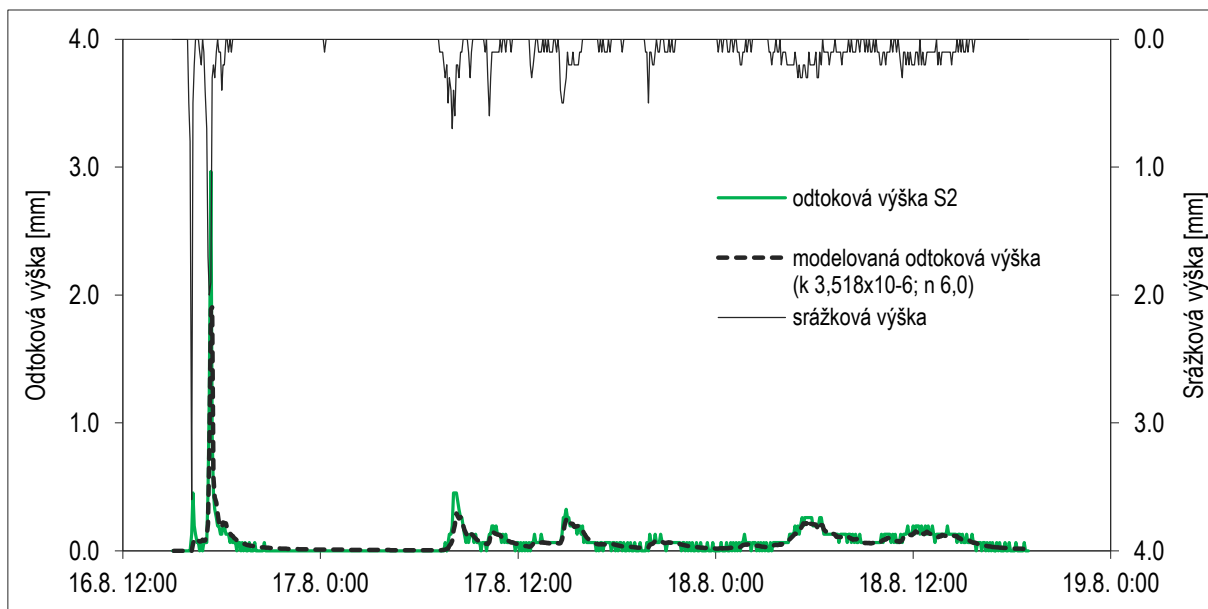
Čas začátku	Srážkový úhrn [mm]	Maximální intenzita [mm/hod]	$k$ [mm <sup>(1-n)</sup> /min]	$n$ [-]	RMSE [mm]	RMSE (k 0,15; n 2,0) [mm]
11.9.2014 14:20	51,4	30,0	$1,837 \cdot 10^{-6}$	4,9	5,16	8,50
14.9.2014 03:30	3,8	6,0	$7,689 \cdot 10^{-3}$	4,0	0,09	0,67
21.9.2014 18:15	12,2	38,4	$2,541 \cdot 10^{-6}$	5,4	1,22	5,22
15.10.2014 10:10	11,4	16,8	$2,539 \cdot 10^{-3}$	5,9	0,19	0,95
27.4.2015 18:00	17,3	30,0	$2,954 \cdot 10^{-6}$	4,9	1,16	6,10
1.6.2015 18:00	5,6	20,4	$1,644 \cdot 10^{-3}$	1,8	0,15	3,47
16.8.2015 15:50	49,8	43,2	$3,518 \cdot 10^{-6}$	6,0	0,81	4,33

Rovnice s parametry optimalizovanými na kumulativní odtok velmi dobře popisuje průběh odtoku většiny epizod (příklad takového průběhu odtoku zobrazuje Obr. 16 s epizodou z 16. srpna 2015). Skutečný průměrný podíl odtoku byl pro těchto 7 epizod 66 %. Optimalizovaný model ho nadhodnotil na 71 %. Odtokovou výšku jednotlivých srážkových epizod lze poměrně spolehlivě určit pomocí takto kalibrovaného modelu.

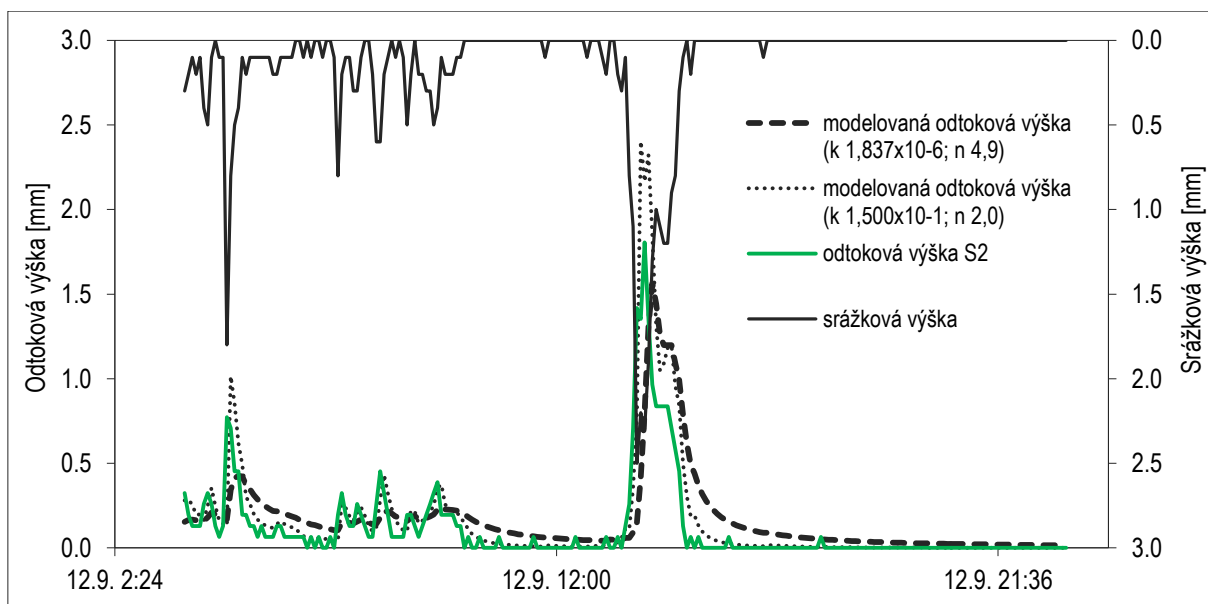
Nejhorší hodnotu RMSE 5,16 mm ze všech modelovaných epizod má srážková epizoda začínající 11. září 2014. Průběh její druhé poloviny (od 12. září 4:00) zobrazuje Obr. 17, na kterém je vidět, že k odchýlení modelovaného průběhu odtoku s optimálními parametry (černá čárkovaná čára) od skutečného (zelená plná čára) dochází ke konci epizody. Déšť má zde podobný průběh jako skutečný odtok. Rychle dosáhne intenzity 30 mm/hod a následně klesá k nule. Oproti tomu modelovaný odtok klesá pozvolněji, a proto dochází v těchto případech k nepřesnosti. Při realizaci modelu s doporučenými koeficienty (černá tečkovaná čára) Stovin et al. (2015) vypočítaný odtok opticky lépe kopíruje skutečný. Celkové kumulativní množství odtoku je však o 7 mm vyšší než skutečné. Znalost celkového koeficientu odtoku se dá přitom lépe uplatnit a proto je často důležitější přesnost celkového odtoku ze systému, než jeho samotný průběh. Pro přesnější závěr je třeba modelovat větší počet epizod.

Dále byla hledána dvojice efektivních parametrů  $k$  a  $n$  platná pro celou sadu srážkových epizod. Minimalizována byla suma RMSE jednotlivých srážkových epizod. Efektivní hodnoty parametrů modelu kaskády

lineárních rezervoárů jsou v tomto případě  $k = 1,744 \cdot 10^{-6}$  a  $n = 6,0$ . S nimi je samozřejmě ale průběh odtoku méně přesný, než v případě optimálních nebo doporučených koeficientů. Nejhůře popisují získané efektivní parametry epizodu ze 14. září 2014. Průměrný odtokový součinitel sady je pak 59 % oproti skutečným 66 %, což je přibližně stejný rozdíl jako u optimálních parametrů získaných pro jednotlivé epizody, jejichž celkový odtokový součinitel je 71 %. Doporučené parametry Stovin et al. (2015) odhadují podíl odtoku na 99 %. Jsou tedy pro segment S2 nepoužitelné.

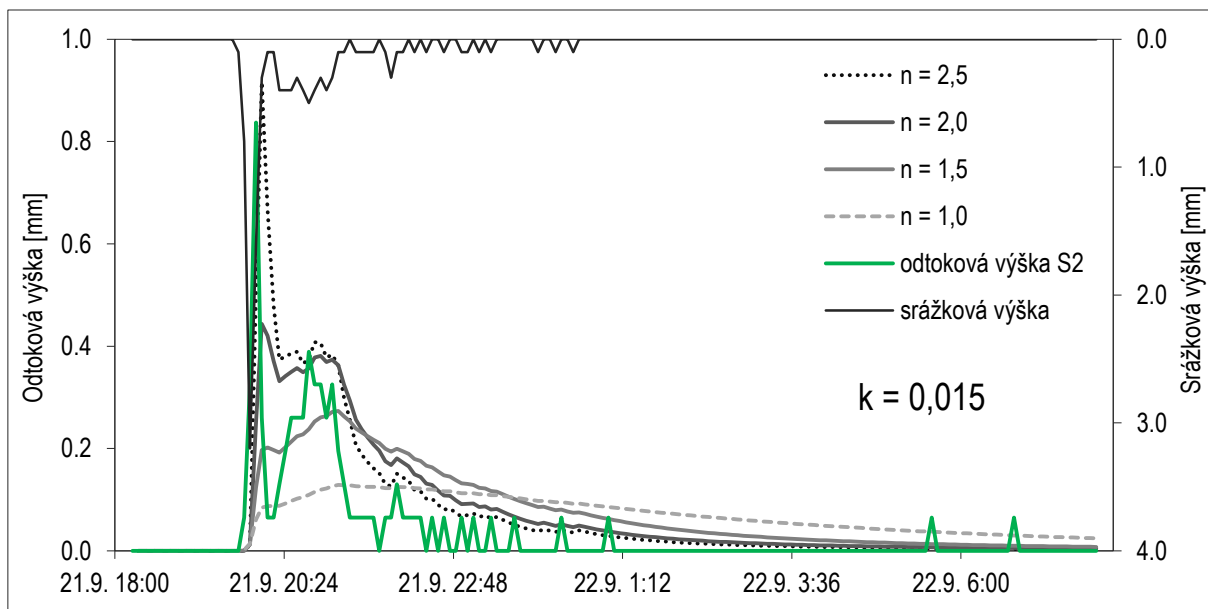


Obr. 16: Skutečný průběh odtoku ze segmentu S2 při epizodě začínající 16. srpna 2015 a průběh modelovaného odtoku s optimalizovanými parametry

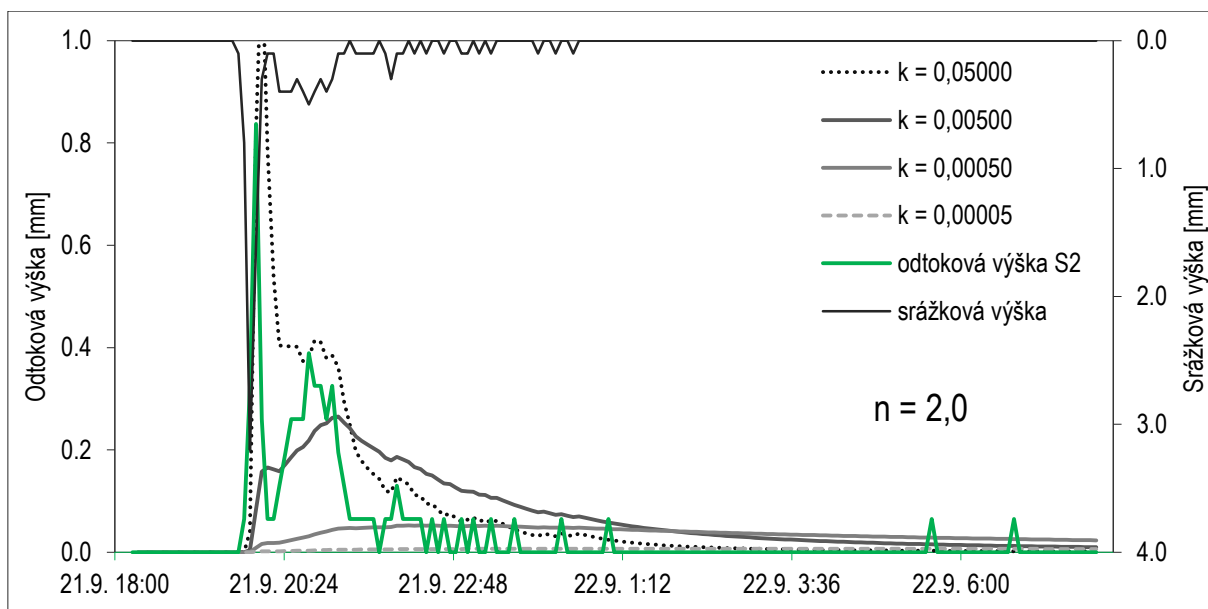


Obr. 17: Druhá polovina srážkové epizody začínající 11. září 2014 s odtokem ze segmentu S2, vypočteným odtokem s výchozími parametry a vypočteným odtokem s optimalizovanými parametry; při velké intenzitě lze pozorovat největší vychýlení

Pro optimalizované parametry modelu kaskády lineárních rezervoárů byla také zpracována jednoduchá citlivostní analýza. Pro parametr  $n$  jí zobrazuje Obr. 18, pro parametr  $k$  Obr. 19. Na obrázcích je vždy pevně stanovena hodnota druhého parametru (pro  $n$  to je  $k = 0,015$ ; pro  $k$  je to  $n = 2,0$ ). Z obrázků vyplývá, že u parametru  $n$  rozhoduje o charakteru vypočteného průběhu každé jeho navýšení či snížení o jednotky, zatímco v případě parametru  $k$  rozhodují o jeho změně až celé řády. Model je tedy v případě sedmi modelovaných srážkových událostí citlivější na parametr  $n$ .



Obr. 18: Citlivostní analýza počtu kaskád lineárních rezervoárů  $n$  s pevným koeficientem lineárních rezervoárů  $k = 0,015$ ; jedná se o srážku začínající 21. září 2014 a modelovaný odtok ze segmentu S2



Obr. 19: Citlivostní analýza koeficientu lineárních rezervoárů  $k$  s pevným počtem kaskád lineárních rezervoárů  $n = 2,0$ ; jedná se o srážku začínající 21. září 2014 a modelovaný odtok ze segmentu S2

---

## 5. Závěr

Statisticky byly zhodnoceny retenční charakteristiky srážko-odtokových epizod dvou testovacích segmentů zelené střechy na budově UCEEB v Buštěhradu. Sledovány byly časové změny těchto charakteristik. Dále byl vyhodnocen vliv srážkového úhrnu, trvání srážky a rozvoje vegetace na tyto charakteristiky. Zjištěny byly také odtokové koeficienty obou segmentů ve vegetačních sezónách v letech 2014 a 2015. Sestavením rovnice hydrologické bilance pro vážený testovací segment S2 byly zjištěny nesrovnalosti mezi měřeními vah a srážkoměru s průtokoměrem. Pomocí jednoduchého modelu kaskády lineárních rezervoárů byl vypočten odtok ze segmentu S2.

Hodnocené období obsahuje málo epizod se středními a velkými srážkovými úhrny, tj. 25 až 50 mm, což může zkreslovat některé dosažené výsledky. Segment S2, obsahující substrát Optigreen Type E, dosahuje průměrně vyšších odtokových koeficientů než segment S1 vyplněný technosolem. Rozptýl poměru odtoku a srážkového úhrnu je u S2 také vyšší. Odtok z něj tedy probíhá náhodněji. V obou případech se retenční schopnosti meziročně ustalují a vznikají tak přehlednější závislosti.

Vegetace má na snížení odtoku dešťové vody ze segmentu pozitivní vliv. Na testovacím segmentu S1 se rozvíjí rychleji než na segmentu S2. Lepší prosperita vegetace v segmentu S1 může být způsobena použitým substrátem.

Odtoková výška segmentu S1 tvořila ve vegetačním roce 2014 35,0 % srážkové výšky, v roce 2015 to bylo 21,7 %. Odtokový součinitel se tedy snížil o 62,1 %. U segmentu S2 došlo ke snížení o 59,2 %, protože z něj ve vegetačním roce 2014 odteklo 70,3 % napršené vody a v roce 2015 41,6 %. Nižší odtok ze segmentu S1 je způsoben jeho dřívějším osázením vegetací, která se u něj rychleji rozvinula a použitým jemnozrnějším substrátem.

Porovnání bilancí v případě testovacího segmentu S2 upozornilo na nesrovnalosti mezi bilancí z měření srážkoměrem a průtokoměrem a bilancí pomocí vah. Zjištěno bylo, že mechanické zatížení způsobené prouděním vzduchu či dynamické síly srážky, nemá na hmotnostní bilanci vliv. Částečně jí ovlivňuje nezakrytý svodný žlab, odvádějící vodu ze segmentu do průtokoměru. Dále má na ní vliv absence dynamické kalibrace průtokoměru.

U modelu kaskády lineárních rezervoárů byly použity literaturou doporučené parametry, které poměrně dobře popisují průběh odtoku vody ze systému. Celkovou sumu odtoku, která je z hlediska zatížení kanalizační sítě nejdůležitější, však velmi nadhodnocuje. Optimálními pro zvolenou sadu se ukázalo  $k = 1,744 \cdot 10^{-6}$  a  $n = 6,0$ . Největší odchylky modelu od skutečnosti nastávají při náhlé změně intenzity deště během srážkové epizody.

Výsledky, získané pozorováním testovacích segmentů S1 a S2, potvrzují výhody zelených střech. Zejména byly sledovány odtokové poměry. U segmentu S1 došlo ke snížení odtoku o více než 70 %, u segmentu S2 to bylo přes 50 %. Oproti střechám z běžných materiálů, které odtok téměř netlumí, se jedná o výrazné navýšení. Segmenty jsou také vhodné k testování a kalibraci modelů odtoku, které mohou být následně použity ve skutečném provozu.

## 6. Seznam obrázků

Obr. 1: Fotografie střechy budovy UCEEB v Buštěhradu se dvěma testovacími segmenty S1 a S2, srážkoměrem, meteorologickou stanicí a přístrojem na měření radiace vpravo (převzato z Jelínková et al., 2016) .....	12
Obr. 2: Pohled na testovací segment zelené střechy se substrátem a rostlinami (upraveno z Jelínková et al., 2015).....	14
Obr. 3: Průřez testovacím segmentem s popisem jednotlivých vrstev v měřítku 1:3 .....	14
Obr. 4: Zrnitostní křivky pro substráty použité v testovacích segmentech a na střeše budovy UCEEB; detaily zobrazují typickou strukturu zeminy získanou přístrojem mikro CT (upraveno z Jelínková et al., 2015) .....	15
Obr. 5: Časová osa zobrazující období, ze kterých byly získány výstupy přístrojů na střeše budovy UCEEB pro analýzu vývoje odtokových poměrů; dále zobrazuje datum sestavení a osázení segmentů S1 a S2.....	16
Obr. 6: Vývoj vegetačního krytu v testovacích segmentech S1 a S2 na střeše budovy UCEEB v letech 2014 a 2015 (upraveno z Jelínková et al., 2016) .....	17
Obr. 7: Histogram relativních četností srážkových epizod v obou vegetačních sezónách 2014 a 2015 dohromady i odděleně, pro každý rok zvlášť .....	20
Obr. 8: Průměry odtokových koeficientů segmentů S1 (vlevo) a S2 (vpravo) v jednotlivých třídách srážkové výšky, dohromady i zvlášť pro vegetační sezóny v letech 2014 a 2015 .....	21
Obr. 9: Krabicový diagram pro segmenty S1 (vlevo) a S2 (vpravo), kde je střední část ohraničena kvartily a mezi nimi se nachází linie vymezující medián; linie vycházející ze střední části ohraničuje minimum a maximum datového souboru .....	21
Obr. 10: Závislost odtokového koeficientu obou segmentů na srážkové výšce ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; velikost bubliny vyjadřuje intenzitu srážky od 0,1 do 3,6 mm/5min .....	22
Obr. 11: Závislost odtokového koeficientu obou segmentů na době trvání srážky ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; velikost bubliny vyjadřuje intenzitu srážky od 0,1 mm/5min .....	23
Obr. 12: Závislost odtokových koeficientů na vegetačním krytu segmentů S1 a S2 ve vegetačních sezónách 2014 a 2015; regresní přímka je proložena oběma datovými sadami.....	23
Obr. 13: Kumulace srážkové výšky a odtokové výšky pro oba segmenty ve vegetačních sezónách 2014 (nahore) a 2015 (dole).....	24
Obr. 14: Srážková výška, naměřená 16. srpna 2015, spolu s relativním nasycením substrátu na hlavní svislé ose; vývoj hydrologické bilance vypočítané z bilanční rovnice (2) na vedlejší svislé ose .....	26
Obr. 15: Odtoková výška, naměřená při srážkové epizodě začínající 16. srpna a končící 18. srpna 2015 na hlavní svislé ose; vývoj hydrologické bilance bez oprav (modrá čára), se započítanými srážkami dopadajícími do svodného žlabu (světle fialová čára A) a se započítanými žlabem a dynamickou kalibrací (tmavě fialová čára B) .....	26
Obr. 16: Skutečný průběh odtoku ze segmentu S2 při epizodě začínající 16. srpna 2015 a průběh modelovaného odtoku s optimalizovanými parametry.....	28
Obr. 17: Druhá polovina srážkové epizody začínající 11. září 2014 s odtokem ze segmentu S2, vypočteným odtokem s výchozími parametry a vypočteným odtokem s optimalizovanými parametry; při velké intenzitě lze pozorovat největší vychýlení .....	28
Obr. 18: Citlivostní analýza počtu kaskád lineárních rezervoárů $n$ s pevným koeficientem lineárních rezervoárů $k = 0,015$ ; jedná se o srážku začínající 21. září 2014 a modelovaný odtok ze segmentu S2 .....	29
Obr. 19: Citlivostní analýza koeficientu lineárních rezervoárů $k$ s pevným počtem kaskád lineárních rezervoárů $n = 2,0$ ; jedná se o srážku začínající 21. září 2014 a modelovaný odtok ze segmentu S2.....	29

---

## 7. Seznam tabulek

Tab. 1: Příklad vlastností zelené střechy Duo společnosti Optigrün International AG s vynikající tepelnou izolací proti sezónním výkyvům teplot, za použití extenzivní či intenzivní zeleně (upraveno z Optigreen, 2016) .....	10
Tab. 2: Fyzikální a chemické vlastnosti substrátů použitých ve dvou testovacích segmentech a na střeše budovy UCEEB (převzato z Jelínková et al., 2015).....	15
Tab. 3: Srážkové a odtokové výšky ve vegetačních sezónách 2014 a 2015 s odtokovými koeficienty .....	24
Tab. 4: Dynamická kalibrace použitá na opravu hydrologické bilance (sestavena na základě Humprey et al. 1997) .....	26
Tab. 5: Srážkové epizody využité k výpočtu odtoku ze segmentu S2 z vegetačních sezón v letech 2014 a 2015 se stručnou charakteristikou (čas začátku, srážkový úhm a maximální intenzita), optimalizovanými koeficienty $k$ a $n$ s ukazatelem přesnosti RMSE a ukazatelem RMSE s doporučenými koeficienty .....	27



---

## 8. Seznam použité literatury

- Chai T., Draxler R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?. In: *Geoscientific Model Development*. 7: 1247-1250.
- Berretta Ch., Poë S., Stovin V., 2014. The Influence of Substrate and Vegetation on Extensive Green Roof Hydrological Performance. *13th International Conference on Urban Drainage*. Malaysia: Sarawak.
- Getter K. L., Rowe D. B., Andresen J. A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. In: *Ecological Engineering*. 31: 225-231.
- Jelínková 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. Praha: UCEEB a FSv ČVUT, 4: 262-270.
- Jelínková V., Šácha J., Dohnal M., Skala V., 2016. Thermal and water regime of green roof segments filled with Technosol. *EGU General Assembly 2016*. Vienna, Geophysical Research Abstracts.
- Kolb W., Schwarz T., 1993. Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern. *Veitschöchheimer Berichte*. 4: 28-36.
- Liesecke H. J., 1999. Extensive roof greening on a 5° slope. *Stadt und Grün*. German, 48: 337-346.
- Optigreen International AG, nedatováno. [online] Základy navrhování zelených střech. [cit. 3. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.optigreen.cz/>
- Optigreen International AG, nedatováno. [online] Zelené střechy „Duo-střecha“. [cit. 3. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.optigreen.cz/>
- R. M. Young Company, nedatováno. [online] Tipping Bucket Rain Gauge. [cit. 5. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.youngusa.com/products/3/18.html>
- Shade C., 2000. Wasserrückhaltung und Abflussbeiwerte bei dünn-schichtigen extensivbergünungen. *Stadt und Grün*. 49: 95-100.
- Schiefler K., 2005. Zelené střechy, zelené fasády, zelená parkoviště. Autor: Svaz zakládání a údržby zeleně - Šimečková J. a spol. Brno, 6-7.
- Stanescu V., Musy A., 2006. [online] 4.2.2. Instantaneous unit hydrograph resulting from conceptual models. [cit. 10. 5. 2016] Dostupné z: [http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod\\_1b/chapt\\_4/main.htm](http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1b/chapt_4/main.htm)
- Stovin V., Vesuviano G., De-Ville S. Definin green roof detention performance. Sheffield, UK: Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, 2015.
- Šimečková J., Večeřová I. a spol., 2010. *Zelené střechy - naděje pro budoucnost*. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně.
- Šimečková J. a spol., 2005. *Zelené střechy, zelené fasády, zelená parkoviště*. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně.
- Villarreal E. L., Bengtsson L., 2005. Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*. 25: 1-7.
- Yio M. H. N., Stovin V., Werdin J., Vesuviano G., 2013. Experimental Analysis of Green Roof Detention Characteristics. *Water Sci. Tech.* 68 (7), 1477-1486.