

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**DEMONSTRAČNÍ EXPERIMENT S MĚŘENÍM ODTOKU Z EXTENZIVNÍCH  
ZELENÝCH STŘECH**

**DEMONSTRATION EXPERIMENT ON EXTENSIVE GREEN ROOF WITH RUNOFF  
QUANTIFICATION**

**ELIŠKA JOHANISOVÁ**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

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

Praha 2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Eliška	Jméno: Johanisová	Osobní číslo: 484665
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Demonstrační experiment s měřením odtoku z extenzivních zelených střech  
Název bakalářské práce anglicky: Demonstration experiment on extensive green roof with runoff quantification

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte detailní rešerši vybrané relevantní literatury na téma odtoku ze zelených střech. Proveďte demonstrační skrápěcí experiment s měřením odtoku ze zkušebních ploch zelených střech různých skladeb umístěných na střeše UCEEB, ČVUT. Experiment vyhodnoťte, zejména stanovte míru prostorové nerovnoměrnosti skrápění a charakteristiky odtoku. Výsledky měření vyhodnoťte, vhodným způsobem prezentujte a diskutujte. Navrhněte případná vylepšení metodiky experimentu.

Seznam doporučené literatury:

Články v časopisech indexovaných v databázi WOS.

Environmental Soil Physics, Academic Press, 2006

Burian a kol., Vegetační souvrství zelených střech, Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, SZUS, 2019

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

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

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

22.2.2022

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto 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).

Eliška Johanisová

V Praze dne .....

.....

## **Poděkování**

Tato bakalářská práce vznikla v rámci společného projektu UCEEB, ČVUT v Praze s firmou Metrostav a.s. „Projekt výzkumu a vývoje – výzkum souvrství extenzivních zelených střech“. Děkuji za možnost podílení se na experimentu v rámci tohoto projektu.

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce panu doc. Ing. Michalu Sněhotovi Ph.D. za jeho odborné a vstřícné vedení a za poskytnutí mnoha cenných rad a informací. Rovněž bych chtěla poděkovat Mgr. Barboře Rybové, Ing. Petře Hečkové a Ing. Marku Petrejemu za pomoc při experimentu. Dík patří také mojí rodině za podporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se věnuje problematice zelených střech. Zkoumá odtok vody z extenzivních zelených střech o různých skladbách při skrápěcím experimentu a popisuje prostorovou nerovnoměrnost skrápění při zvolené experimentální technice.

V rámci práce byl proveden skrápěcí experiment na experimentálních plochách vybudovaných na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov UCEEB, ČVUT v Buštěhradě. Teoretická část práce obsahuje rešerši především z odborných článků z databáze Web of Science. Články popisují obdobné experimenty zabývající se odtokem vody ze zelených střech, které byly realizovány ve světě i na území České republiky. Rešerše shrnuje orientační rozmezí účinnosti střech z pohledu množství odtoku a výčet faktorů ovlivňujících experimenty.

Skrápěcí experiment byl realizován na 6 experimentálních plochách zelených střech osázených rozchodníky za využití 3 komerčně dostupných substrátů (ACRE, BB Com a Rašelina Soběslav). Jednotlivé plochy byly skrápěny zahradním postřikovačem. Byl sledován objem odtoku vody, doba zpoždění odtoku oproti srážce a byly vyhodnoceny jednotlivé odtokové součinitele. Byla sledována a diskutována prostorová nerovnoměrnost skrápění vlivem povětrnostních podmínek.

Výsledky experimentů prokázaly účinnost měřených ploch v omezení odtoku vody a oddálení doby vzniku odtoku. Všechny plochy zadržely přes 90 % objemu srážky. Proběhlo porovnání jednotlivých ploch a charakteristik jejich odtoku.

## **Klíčová slova**

zelené střechy, redukce odtoku, retence vody, odtokový součinitel

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the issue of green roofs. It investigates the runoff from extensive green roofs of different compositions and describes the spatial non-uniformity of sprinkling irrigation.

Within the framework of the thesis, a sprinkling irrigation experiment was carried out on experimental surfaces built on the roof of the building of the University Centre for Energy Efficient Buildings UCEEB, CTU in Buštěhrad. The theoretical part of the thesis contains a search mainly from scientific articles from the Web of Science database. The articles describe similar experiments dealing with water runoff from green roofs that have been carried out in the world and in the Czech Republic. The review summarizes the indicative range of roof efficiency and a list of factors influencing the experiments.

The scraping experiment was carried out on 6 experimental green roof areas planted with stonecrops using 3 commercially available substrates (ACRE, BB Com and Rašelina Soběslav). Individual plots were sprinkled with a garden sprinkler. The volume of runoff, the lag time of runoff versus rainfall, and the individual runoff coefficients were monitored. The spatial non-uniformity of sprinkling irrigation due to weather conditions was monitored and discussed.

The results of the experiments demonstrated the effectiveness of the measured areas in reducing runoff and delaying the time of runoff generation. All plots retained over 90 % of the rainfall volume at the given conditions of the experiment. Comparisons were made between the plots and their runoff patterns.

## **Keywords**

green roofs, runoff reduction, water retention, runoff coefficient

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle bakalářské práce .....	12
3	Rešerše literatury.....	13
3.1	Zelené střechy.....	13
3.2	Odtok ze zelených střech .....	15
3.2.1	Charakteristiky odtoku.....	15
3.2.2	Roční a sezónní odtok .....	16
3.2.3	Odtok z jednotlivých srážkových epizod .....	20
3.2.4	Faktory ovlivňující odtok.....	21
3.2.5	Změna odtoku v čase vlivem pedogeneze a pokryvnosti vegetací.....	22
3.2.6	Význam odtokového součinitele v praxi a metody jeho stanovení .....	22
3.3	Shrnutí rešerše.....	24
4	Materiály a metody.....	25
4.1	Charakteristika lokality .....	25
4.2	Popis ploch a použitých substrátů .....	26
4.3	Vegetace .....	29
4.4	Meteorologická stanice .....	31
4.5	Popis experimentu .....	32
4.5.1	Klimatické podmínky.....	32
4.5.2	Rozkolísanost přítoku.....	34
4.5.3	Měření úhrnu srážky .....	35
4.5.4	Charakteristika doby srážky .....	37
4.5.5	Odnos srážky vlivem povětrnostních podmínek.....	38
4.5.6	Způsob měření odtoku vody ze zkušebních ploch.....	39
4.5.7	Měření počáteční vlhkosti substrátů .....	40
4.5.8	Nerovnoměrnost skrápění – program Surfer .....	41

5	Výsledky experimentu .....	42
5.1	Snížení odtoku vody.....	42
5.2	Počáteční vlhkosti substrátů.....	46
5.3	Nerovnoměrnost srážky.....	46
5.4	Shrnutí a porovnání měřených ploch .....	48
6	Diskuse.....	50
6.1	Porovnání zkušebních ploch .....	50
6.2	Spolehlivost skrápění.....	51
7	Závěr .....	53
8	Seznam použitých zdrojů .....	54



# 1 Úvod

Zelené střechy se v poslední době stávají stále oblíbenějším prvkem zelené infrastruktury. Díky jejich výhodám se uplatňují především v městských, hustě obydlených oblastech. Nejčastěji se zelené střechy uplatňují na rodinných domech. V roce 2020 vzniklo v České republice asi 312 000 m<sup>2</sup> nových zelených střech, což je o 21,9 % více než za rok 2019 (Zelené střechy v ČR – Zpráva o trhu, 2021).

Zelené střechy diskutované v této práci lze najít i pod označením vegetační střechy, střešní zahrady či ozeleněné střechy. Tyto názvy lze volně zaměňovat a všechny jsou běžně používány. Obecně se jedná o střechy úmyslně pokryté vegetací (Dostálová a kol. 2021).

Ozeleněné střechy nejsou ale jen novinkou současnosti, byly využívány už v historii. První zelené střechy sloužily především jako ochrana před klimatickými vlivy, estetická či ekologická funkce nebyla tedy hlavním důvodem realizace. Tradiční historické střechy vznikaly například na Islandu, Faerských ostrovech, v Kanadě, v USA či ve Skandinávii. Zde střechy sloužily k izolaci a akumulaci tepla. Ve Skandinávii měly tradiční střechy velkou mocnost. Jejich konstrukci tvořil dřevěný krov a dřevěné latě pro zamezení sesuvu horních vrstev. Travní drny se umísťovaly na několik vrstev březové kůry, která sloužila jako ochrana nosné konstrukce proti vylučovaným huminovým látkám z travních drnů. Drny se pokládaly v několika vrstvách, kořeny směrem nahoru, až poslední vrstva se umístila opačně a kořeny měly dostatečný prostor pro zakořenění. Střechy nebyly zcela nepropustné, proto se budovaly na konstrukcích se sklonem 30–45 °. Plocha, na kterou srážky dopadaly, se tím zmenšila a srážková voda rychleji odtékla. Jejich životnost byla kolem 30 let. Příklad střechy postavené podle tradiční norské metody je vidět na obr. 1.1. Zelené střechy vznikaly ale i v teplých oblastech, jako Tanzanie či Guatemala, kde naopak díky své izolaci vnitřní prostory ochlazovaly (Čermáková, Mužíková 2009).

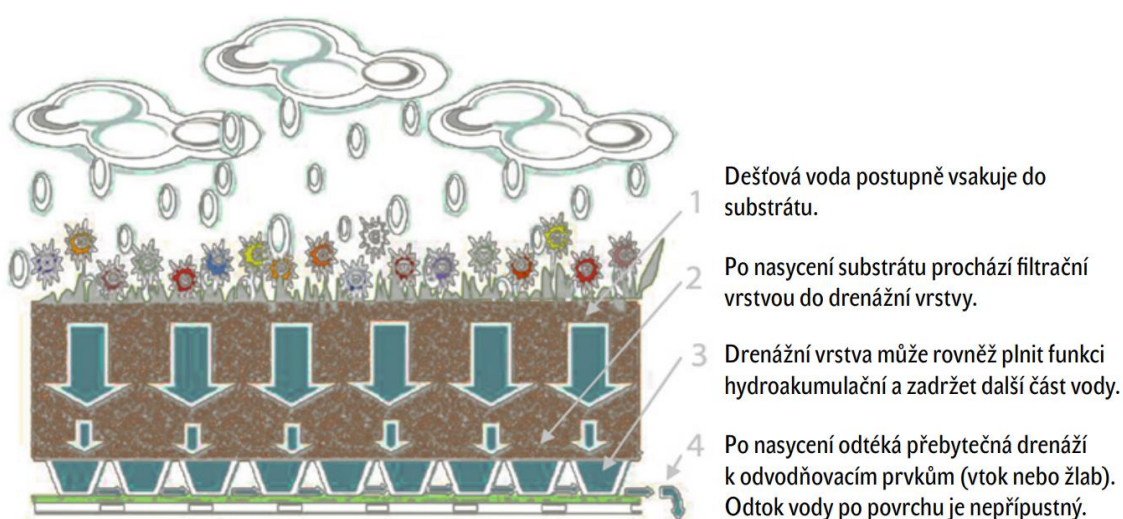


Obr. 1.1 Tradiční norská vegetační střecha (převzato z Petáková 2012)

První zmínky o ozeleněných střechách sahají ale až do přelomu 7. a 8. století př. n. l. do starověké Mezopotámie do Babylónu. Vykopávky odhalily reliéfy zobrazující několikapatrové zelené terasy dokonce s vlastním zavlažovacím systémem zavodňovacích kanálů. Příkladem jsou i Semiramidiny visuté zahrady. Později, v 17. století se objevují i první teoretické práce zabývající se problematikou zahrad na střechách. Postupem času se objevuje více myšlenek vyzdvihujících estetickou funkci zelených střech především pro odpočinek ve městech, později se zaměřují i funkci ekologickou. Začátkem 20. stol. byla hlavním limitujícím faktorem vysoká hmotnost substrátů a celé konstrukce střech a také kvalita hydroizolací. Postupem času se využívané technologie zdokonalovaly a koncem 20. stol. je např. v Německu tato technologie již běžně využívána, v některých případech je dokonce povinná. Obdobně je tomu tak i ve Švýcarsku. V Rusku nebo v Kanadě jsou zelené střechy zkoumány i s ohledem na zemědělské využití kvůli nedostatku zemědělské půdy (Čermáková, Mužíková 2009).

Pro správnou funkci zelené střechy je třeba brát ohled na požadavky stavby. Zelená střecha může ovlivnit především stabilitu stavby a celistvost střešního pláště účinkem vlhkosti. Při návrhu střechy je třeba brát v úvahu větší plošné zatížení, nutnou ochranu proti prorůstáním kořenů, sklon střechy, zajištění proti erozi, správné zavlažování i odvodnění, bezpečnost pohybujících se osob či volbu správné vegetace a její údržbu. Pokud je střecha navržena správně, přinese mnoho výhod (Dostálová 2008).

Hlavní výhoda diskutovaná v této práci je retence dešťové vody. Principem zelené střechy dojde ke snížení objemu odtoklé vody a oddálení začátku odtoku. Odtok začne až po nasycení vrstvy substrátu (Berndtsson 2010). Základní schéma tohoto principu je vidět na obr. 1.2. Proto je právě měření odtoku náplní této práce.



Obr. 1.2 Správná funkce vegetačního souvrstí (převzato z Dostálová a kol. 2021)

Pro měření odtoku byl v rámci této bakalářské práce realizován demonstrační skrápěcí experiment provedený na střeších budovy UCEEB. Byly naměřeny hodnoty odtoků z experimentálních ploch o různé skladbě souvrství, aby bylo možné jednotlivé plochy porovnat. Střechy byly postupně zavlažovány a z jednotlivých ploch byl měřen odtok. Úvodní část práce se zaměřuje na rešerši studií zabývajících se odtokem vody ze zelených střeš a popisem experimentů, které na toto téma proběhly jak v České republice, tak i v zahraničí. Následuje přesný popis skrápěcího experimentu. Výsledky experimentu a jejich diskuse jsou následně uvedeny v navazující kapitole.

Moje úloha v popisované práci spočívala v účasti na experimentu, práci v laboratoři a následné analýze dat. Podílela jsem se na měření odtoku ze zkušebních ploch, odebírala jsem vzorky pro zjištění počátečních vlhkostí substrátů. S vzorky jsem následně pracovala i v laboratoři, kde došlo k jejich vysušení. Učinila jsem následnou interpretaci naměřených dat a vyhodnocení výsledků především v programu Excel. Údaje o úhrnu srážek za dobu trvání experimentu jsem přenesla do programu Surfer, kde jsem vyhodnotila prostorovou nerovnoměrnost srážky.

## 2 Cíle bakalářské práce

Hlavním cílem bakalářské práce je uskutečnit jednoduchý skrápěcí experiment pro zjištění odtoku ze zkušebních ploch o různých skladbách umístěných na střeše UCEEB, ČVUT pro jeden počáteční stav vlhkosti. Cílem práce je interpretace výsledků a diskuse naměřených hodnot včetně uvážení prostorové nerovnoměrnosti skrápění během experimentu. Dílčím cílem bakalářské práce je ověření proveditelnosti skrápěcího experimentu na zelené střeše, zhodnocení metodiky, a doporučení pro případné navazující experimenty.

Cílem teoretické části je zpracovat rešerši na téma odtoku vody ze zelených střech. Rešerše se zaměřuje na články popisující experimentální měření této veličiny.

## 3 Rešerše literatury

### 3.1 Zelené střechy

Zelené střechy jsou, pro jejich výhodné funkce, stále hojněji využívány, ať už na střechy novostaveb nebo jako dovybavení stávajících budov. Zelené střechy zadržují dešťovou vodu, zpomalují a oddálují odtok vody do kanalizace. Zatížení kanalizační sítě odtokem ze zelených střech při intenzivních srážkách je nižší než u střech konvenčních a nemusí dojít k přepadu na odlehčovacích komorách stokové sítě. Důležitou funkcí je i zlepšení kvality ovzduší, snížení prašnosti i hlučnosti, zvýšení vlhkosti vzduchu a vyrovnávání teploty. Zelené střechy mají za cíl snižovat extrémní teploty v letních obdobích (Burian a kol. 2019; Berndtsson 2010).

Globální oteplování a extrémní teploty ve městech představují významnou zdravotní hrozbu. Dle článku (Robine a kol. 2008) mohl počet úmrtí, spojených s extrémní vlnou veder v roce 2003 v Evropě, dosáhnout až čísla 70 000. Dodatečná úmrtí způsobená vlnou veder je ovšem obtížné odhalit. Další výhodou zelených střech je funkce urbanistická. Ve městech, kde je zeleně málo, vytváří příjemné prostředí pro pobyt lidí. Vytváří i útočiště pro ptáky, hmyz i ostatní živočichy a přispívá tak k biodiverzitě prostředí. Vrstva zelené střechy chrání střešní izolaci před znehodnocením v důsledku UV záření. Vegetace sluneční záření a teplo zachycuje a částečně i odráží. Snižují se tak náklady na vytápění a klimatizaci budov. Využitím zelené střechy stoupá i užitná hodnota nemovitosti (Burian a kol. 2019). Výhody zelených střech jsou žádoucí především ve městech, kde dochází k vytlačování travnaté, či lesnaté plochy nepropustnými povrchy jako silnice nebo střechy budov. Nepropustné plochy tvoří ve městech kolem 40–50 % povrchu (Mentens a kol. 2006).

Zelené střechy můžeme rozdělit do tří skupin. Pokud se jedná o střechy s hloubkou substrátu do cca 150 mm, mluvíme o střechách extenzivních. Ty mohou být umístěny na střechách do sklonu až 45 °, nejčastěji jsou osazovány sukulentními rostlinami, popřípadě mechy, trávami nebo bylinami. Výběr rostlin záleží na místních podmínkách. Extenzivní střechy nevyžadují dlouhodobě pravidelnou zálivku. V rámci dokončovací fáze je ale třeba provádět pravidelnou údržbu, včetně zálivky. Když dojde již k dostatečnému uchycení rostlin, po dosažení 90 % pokrytí plochy, stává se střecha již méně náročnou v porovnání s ostatními typy. Extenzivní zelené střechy se většinou navrhují nepochozí.

Střechy s větší hloubkou substrátu nazýváme intenzivní, zde mohou růst traviny, byliny, trvalky, keře, stromy a ve výjimečných případech i užitkové plodiny. Hloubka substrátu se volí podle výběru rostliny, časté jsou hloubky okolo 300 mm. Střechy vyžadují intenzivní péči, v suchém období je třeba dodatečná zálivka, často je vybudovaný závlahový systém, je třeba přihnojování, sečení či odstraňování ostatních druhů rostlin. Intenzivní střechy jsou běžně pochozí a mohou být navrženy za

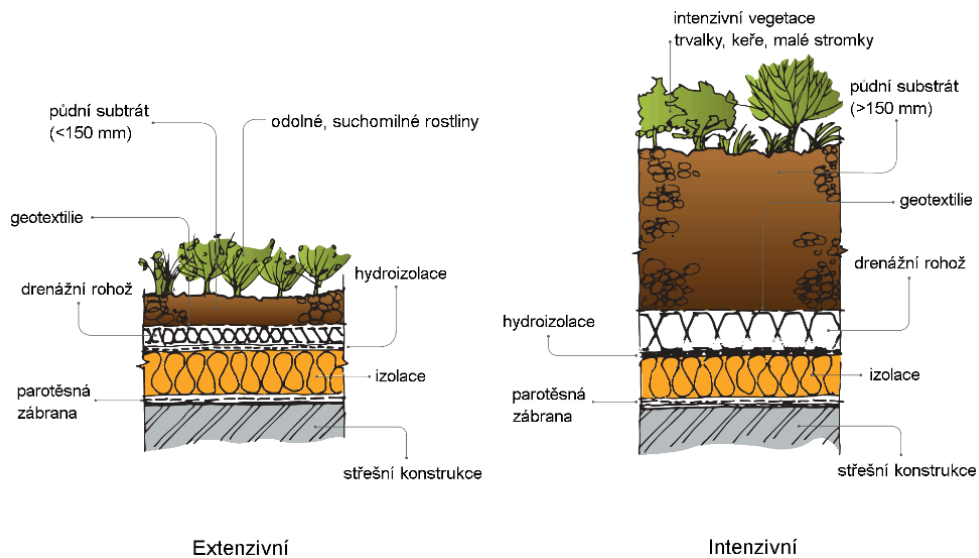
účelem pobytu osob, tzv. pobytové. Příklady extenzivní a intenzivní zelené střechy můžeme vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Ukázky extenzivní (vlevo) a intenzivní (vpravo) zelené střechy (převzato z Senjug 2018, Green-blue urban grids 2022)

Třetím typem je střecha polointenzivní. Kombinuje extenzivní a intenzivní systém. Hloubka substrátu se pohybuje mezi 150–300 mm. Vegetace zde může být náročnější, je možné využít například i dřeviny. Péče je náročnější než u střechy extenzivní, v suchém období je třeba zalívka, dle volby substrátu i přihnojování (Burian a kol. 2019; Mentens a kol. 2006).

Vrstvy zelených střech označujeme jako funkční vrstvy vegetačního souvrství. Na obr. 3.2 můžeme vidět typické souvrství extenzivní a intenzivní zelené střechy. Na povrchu je viditelná vegetace, osázení zelené střechy se liší dle jejího druhu. Následuje vegetační vrstva tvořená půdním substrátem sloužící k uchycení kořenů rostlin a absorpci vody. Pod ní je vložena filtrační vrstva (textilie) pro zachycení jemných částic, které mohou být vyplavovány ze substrátu. Částice se nesmí dostat do drenážní vrstvy, která by se tak mohla zanést. Drenážní vrstva umožňuje odtok vody ze souvrství. Pod drenážní vrstvou se nachází ochranné vrstvy střechy a samotná konstrukce střešního pláště. Pokud se jedná o instalaci střech na stávající budovy, může být souvrství doplněno o kořenovzdornou vrstvu, která chrání hydroizolaci střechy před prorůstáním kořenů. Nově pokládané hydroizolační asfaltové pásy či folie jsou ale samy o sobě již dostatečnou zábranou (Burian a kol. 2019; Mentens a kol. 2006).



Obr. 3.2 Vegetační souvrství extenzivní a intenzivní zelené střechy (upraveno z Elkind 2022)

### 3.2 Odtok ze zelených střech

Hodnota odtoku je jeden z hlavních parametrů při hodnocení účinnosti zelených střech. V databázi Web of Science lze nalézt okolo 130 odborných článků zabývajících se právě experimenty pro zjištění odtoku ze zelených střech. Mentens a kol. (2006) napsali rešeršní článek shrnující již vydané publikace, především z německé literatury, na téma snižování odtoku dešťové vody ze zelených střech. Ze shrnuté literatury vyplývá, že z běžných nevegetačních střech se sklonem 2 % odeče asi 91 % srážek. Ve městech tedy dochází k zrychlenému odtoku vody, voda je znečištěna omýváním městských povrchů, zvyšuje se riziko povodní a eroze. Rychlým odtokem vody při extrémních srážkách nedochází ani k doplňování podzemní vody. Zelené střechy vodu zachytí a umožňují tak přirozený výpar. Díky absorpci vody se oddálí počáteční doba odtoku, celkový objem odtoku se sníží a rozloží se do delšího časového intervalu. Tento proces nazýváme detence vody. Přirozený hydrologický cyklus napomáhá ke snižování efektu tepelného ostrova ve městech (Mentens a kol. 2006).

#### 3.2.1 Charakteristiky odtoku

Zpracovaná literatura shrnutá v této práci popisuje účinnost zelených střech různými způsoby. Často mluví o snížení neboli redukci odtoku. Udává tak procentuální rozdíl zadržené vody ku srážkám. Stejnou hodnotu udává i celková retenční kapacita zelené střechy. Např. při redukci odtoku a retenci 25 % odeče ze střechy 75 % srážek, zbylých 25 % je zadrženo. V některých publikacích se mluví pouze o procentu odteklé vody, jde tedy o doplněk retenční kapacity. Dalším způsobem je vyjádření dle odtokového součinitele. Při hodnotě odtokového součinitele 0,25 odeče ze střechy 25 % z celkového množství srážek. 75 % vody zůstane zachyceno ve vegetačním souvrství. Např. i v dokumentu Standardy pro navrhování zelených střech (Burian a kol. 2019) jsou rozlišeny dva druhy součinitelů odtoku.

Součinitel špičkového odtoku  $C$ , který udává odtok během návrhového deště o dané intenzitě a dané době trvání. Využívá se pro dimenzování konstrukčních prvků pro odtok z jednotlivých střech. Naopak součinitel objemového (dlouhodobého) odtoku, často značený  $\Psi$ , udává průměrnou hodnotu odtoku za delší časové období, obvykle za rok. Orientační hodnoty odtokového součinitele můžeme nalézt v následující tab. 3.1 ze Standardů pro navrhování (Burian a kol. 2019). Tabulka porovnává normy DIN 1986-100 (německé), ÖNORM B 2501 (rakouské), ČSN 75 6760 (české) a směrnici FLL (FLL 2008). Pokud jsou v normě uvedeny, tak uvádí i sklon střech a rozděluje hodnoty na odtokový součinitel špičkový a objemový (Burian a kol. 2019).

Tab. 3.1 Součinitelé odtoku srážkové vody  $C$  a  $\Psi$  ze zelené střechy (převzato z Burian a kol. 2019).

Mocnost	DIN 1986-100		ÖNORM B 2501	ČSN 75 6760		FLL		
	$C (\leq 5^\circ)$	$\Psi (\leq 5^\circ)$	$C$	$C (<5 \%)$	$C (> 5 \%)$	$C (<5^\circ)^*$	$C (> 5^\circ)$	$\Psi^{**}$
2–4 cm	0,5	0,3	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6
4–6 cm						0,6	0,7	0,55
6–8 cm						0,5	0,6	0,5
8–10 cm						0,5	0,6	0,5
10–15 cm	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	-	0,45
15–25 cm						0,3		0,4
25–30 cm						0,2		0,3
30–50 cm	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2		0,3
> 50 cm						0,1	0,1	

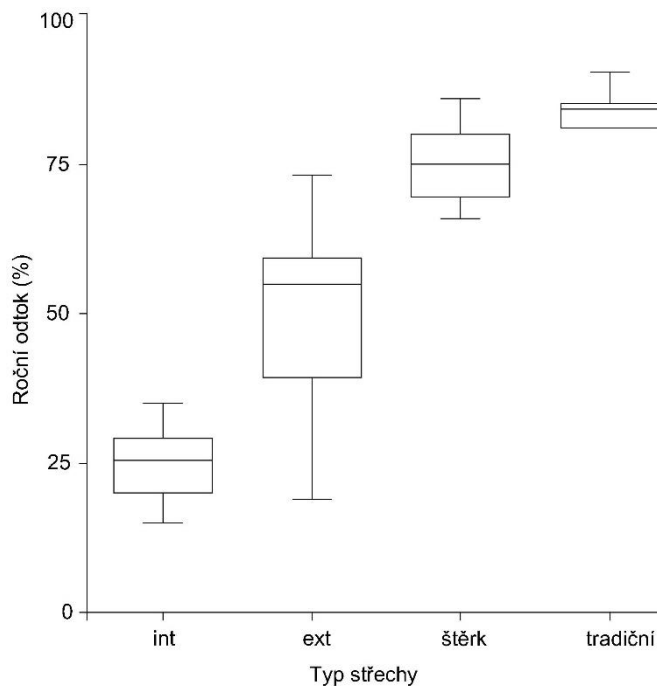
\* Součinitel špičkového odtoku je měřen pro návrhový dešť o intenzitě  $0,03 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  po dobu 15 minut, celkový srážkový úhrn tedy činí 27 mm.

\*\* Hodnoty se vztahují k místům s ročním srážkovým úhrnem 600-850 mm na základě několikaletého měření.

### 3.2.2 Roční a sezónní odtok

Dlouhodobý odtok ze zelené střechy je důležitý pro posouzení její účinnosti. Z rešeršního článku (Mentens a kol. 2006) vyplývá následující porovnání ročních odtoků v závislosti na typu střechy (obr. 3.3). Přehled shrnuté literatury srovnává celkem 145 střech z různých publikací. Ukazuje, že průměrný roční odtok z tradiční nezelené střechy může dosahovat až 91 %, naopak z intenzivní zelené střechy pouze 15 %. U extenzivních střech je pravděpodobné rozmezí odtoku od cca 20 % do 72 %.

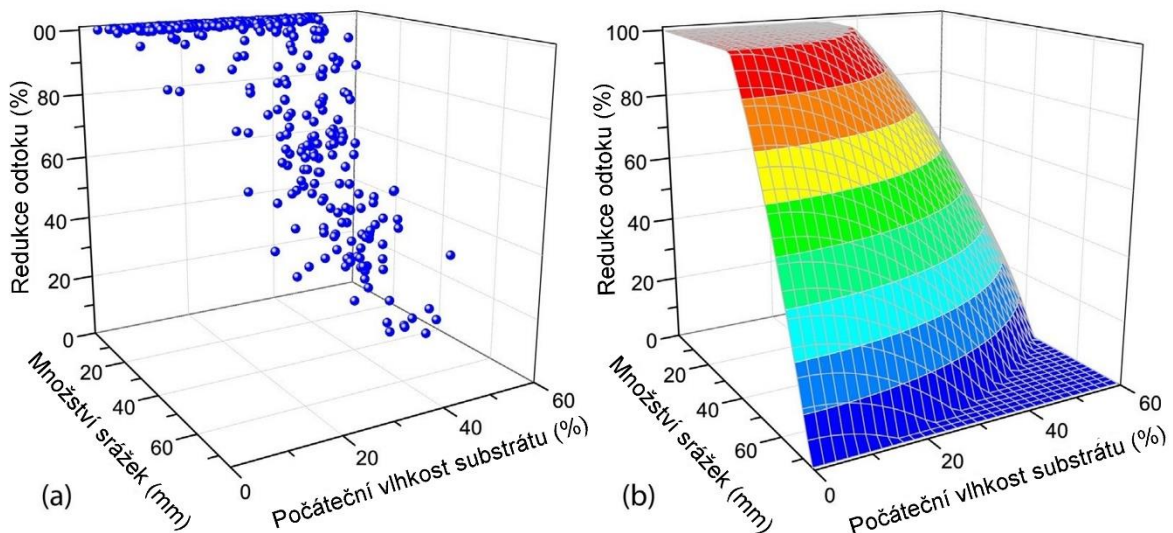




Obr. 3.3 Roční odtok pro různé typy střech jako procento z celkového ročního úhrnu srážek; pro intenzivní zelené střechy ("int",  $n = 11$ ), extenzivní zelené střechy ("ext",  $n = 121$ ), střechy pokryté štěrkem ( $n = 8$ ) a nezelené tradiční střechy ( $n = 5$ ). Krabicové grafy ukazují celkový rozsah údajů (po odstranění odlehlých hodnot), 25 a 75 % kvantil a medián (upraveno z Mentens a kol. 2006).

Soulis a kol. (2017) ze zemědělské univerzity v Aténách se zabývali odtokem z extenzivních zelených střech s různou hloubkou substrátu a rostlinným pokryvem. Popis odtoku je důležitý pro stanovení odtokového součinitele „C“, který se využívá při výpočtu tzv. racionální metody při návrhu na hospodaření s vodou. Zelené střechy se tak posuzují z hlediska zadržení co největšího množství srážek a snížení rychlosti odtoku. Studie se zaměřuje na zjištění snížení odtoku v závislosti na počáteční vlhkosti a moci substrátu, množství napadlých srážek a porovnává různé druhy pokrytí střech. Studie definuje matematický vztah, který by popsal vliv výše zmíněných proměnných na celkový odtok. Experiment probíhal na střeše knihovny Zemědělské univerzity v Řecku v Aténách. Měření probíhalo jeden rok a to od 15. ledna 2015 do 15. ledna 2016. Na střechu bylo umístěno 30 experimentálních lyzimetrů o vnitřních rozměrech 200 x 100 cm a hloubce 30 cm. Byly naplněny substrátem ve 2 variantách hloubek, 8 a 16 cm. Lyzimetry byly osázeny třemi druhy rostlin: *Origanum onites* (Dobromysl obecná), *Festuca arundinacea* (Kostřava rákosovitá) a *Sedum sediforme* (rozchodník), každý druh vždy v 8 lyzimetech. Ty byly osázeny 19. března 2014 s následující pokryvností 56,1 % až 90,3 %. Čtyři lyzimetry zůstaly bez osázení. Zbylé dvě zůstaly zcela prázdné, byl zde pro porovnání simulován odtok z běžných nevegetačních střech. Měření srážek a odtoku probíhalo vždy po 10 minutách, měření vlhkosti substrátu bezdrátovým čidlem vždy po 1 hodině. Za celé měřené období bylo zaznamenáno 45 srážkových událostí. Jednotlivé srážkové události jsou

ohraničeny minimálně třemi hodinami bez deště. Jako doba jedné srážky byla brána doba tři hodiny bez deště. Soulis a kol. (2017) zjistili, že největšímu snížení odtoku došlo obecně při větších hloubkách substrátu (16 cm), při nižší počáteční vlhkosti substrátu a při nižších srážkách. Nejlépe dopadl lyzimetr osázený rostlinou *Origanum onites* (Dobromysl obecná). Zde došlo ke snížení ročního objemu odtoku o 81,1 %. Tato hodnota víceméně spadá do rozmezí očekávané retence ze zmíněného rešeršního článku (Mentens a kol. 2006), kde je nejnižší přepokládaný odtok z extenzivní zelené střechy 20 %, snížení odtoku tedy o 80 % (viz Obr. 3). Naopak nejvyšší průměrný roční odtok byl dle očekávání zaznamenán u lyzimetru bez vegetačního krytu o hloubce substrátu 8 cm. Snížení odtoku zde bylo pouze o 50,6 %. Dále bylo zjištěno, že odtok je výrazně vyšší na podzim. Autoři toto zjištění zdůvodňují vyšším množstvím srážek v tomto období. V létě je odtok naopak nižší. Jsou nižší srážky, a navíc je zvýšen proces evapotranspirace rostlin, což má za následek nižší vlhkost substrátu. Toho využívá i rostlina *O. onites* (Dobromysl obecná) u které byla pozorována nejvyšší redukce odtoku. Autoři studie (Soulis a kol. 2017) zdůvodňují tento výsledek výhodnými znaky rostliny, jako např. chlupaté listy a sezónní dvoutvárnost listů. V zimním období, kdy je vody dostatek, rostou listy velké. Naopak v létě či při nedostatku vody rostou listy malé. Rostlina v tomto období vykazuje menší hodnoty evapotranspirace a odolává tak lépe suchému období. Snížení odtoku u vegetačního pokryvu *Sedum sediforme* (rozchodník) dopadlo o něco hůře, zmíněným důvodem je nižší evapotranspirace těchto sukulentních rostlin, což způsobí vyšší vlhkost substrátu v porovnání např. s *O. onites* (Dobromysl obecná). Při následující srážce je množství vody v substrátu tedy stále vysoké. Popsaným měřením hodnot: množství srážek (mm), počáteční vlhkost substrátu (%) a redukce odtoku (%), sestavili autoři (Soulis a kol. 2017) následující grafické vyjádření rozptylu naměřených hodnot (obr. 3.4 a). Pro vytvoření 3D grafu rozptylu (obr. 3.4 b) byl sestaven matematický vztah spojující vstupní hodnoty. Proložení hodnot touto funkcí vykazuje hodnotu spolehlivosti  $R^2 = 0,70$ . Graf tedy vykazuje určitou míru nejistoty.



Obr. 3.4 a) 3D graf rozptylu hloubky srážek v závislosti na počáteční vlhkosti substrátu a redukcí odtoku a b) 3D zobrazení vyvinuté kvadratické redukční funkce (upraveno z Soulis a kol. 2017).

Carson a kol. (2013) vydali článek zabývající se porovnáním tří nejčastěji používaných typů zelených střech. Experimenty byly provedeny na již vybudovaných střechách v New Yorku. Tato studie se zaměřuje na měření odtoku z ploch v plném měřítku. To znamená, že nejde o měření na zkušebních lyzimetrech s malou plochou, jako popisuje většina jiných publikovaných experimentů. Jde o testování celé střechy včetně nevegetačních oblastí, jako jsou např. chodníky. První typ střechy je systém vegetačních rohoží. Rohože jsou předpěstovány mimo stanoviště a následně umístěny na konstrukci zelené střechy. Střecha o rozloze 600 m<sup>2</sup> je umístěna na obytné budově Kolumbijské univerzity. Je osázena několika druhy rozchodníků. Potenciální akumulací hloubka substrátu této střechy je 12 mm. Potenciální akumulací hloubka označuje součin hloubky substrátu (zde 32 mm) a udávaného % schopnosti zadržení vody. Měření probíhalo pouze na 310 m<sup>2</sup> střechy. Střecha je z 53 % pokryta vegetačními rohožemi, zbytek střechy zabírají především šterkové chodníky. Druhá střecha, umístěná na budově amerického centra pošty United States Postal Service, má rozlohu 10 000 m<sup>2</sup>. Jde o největší zelenou střechu v New Yorku. Vegetační pokryv je na 67 % plochy střechy, zbytek střechy je pokryt šterkem. Plocha, na které byl sledován odtok, má rozlohu 390 m<sup>2</sup> a hloubku substrátu 100 mm. Pěstební substrát byl navezen na střechu do ohraničených střešních oblastí a osázen rozchodníky. Potenciální hloubka uložení substrátu je kolem 35 mm. Třetí střecha je vybudována systémem modulových zásobníků. Ty jsou naplněny substrátem o hloubce také 100 mm a instalovány do řad vedle sebe, přímo na vodotěsnou fólii střešního pláště. Potenciální hloubka uložení substrátu je 32 mm. Nachází se na budově vzdělávacího centra ConEdison. Střecha má rozlohu 2 700 m<sup>2</sup>, odtok je sledován na 940 m<sup>2</sup>. 52 % plochy je pokryto vegetací, nevegetační oblasti tvoří chodníky z pryže, šterku a na střeše se nachází vyvýšená skleněná okna. Všechny zmíněné

střechy nemají sklon větší než 2 %. Měření na všech střeších probíhalo od června 2011 do června 2012. Kvůli měření byla na každé ploše zřízena meteorologická stanice, byly nainstalovány senzory pro měření půdní vlhkosti substrátu, teploty půdy, vzduchu a rychlosti větru. Odtok vody byl měřen speciálně navrženým zařízením kombinujícím odtokovou komoru a trojúhelníkový přeliv s ultrazvukovým senzorem. Z původních 270 srážkových událostí bylo možné využít 243 adekvátně změřených epizod. Za celý rok pozorování byly v průměru naměřeny následující hodnoty odtoku: 64 %, 53 % a 39 % v pořadí střech (1) na budově Kolumbijské univerzity, (2) na budově centra pošty a (3) na budově ConEdison (Carson a kol. 2013). Tyto hodnoty spadají do rozmezí odtoku z extenzivních zelených střech odvozeného v rešeršním článku Mentens a kol. (2006), kde byl odtok stanoven mezi 20-72 % (viz obr. 3.3). Experiment (Carson a kol. 2013) také potvrdil sezónní změny v množství odtoku. Největší rozdíly byly pozorovány u střechy (1) z vegetačních rohoží, kdy v letních měsících dosáhla hodnota redukce odtoku až 70 %, ale v zimních měsících pouze 28 %. Jedná se celkovou retenci během daného ročního období.

### 3.2.3 Odtok z jednotlivých srážkových epizod

Hodnota odtoku z jedné srážkové epizody se může značně lišit od roční hodnoty odtoku. Jednorázový odtok z konkrétní jedné srážky nemusí mít vždy dobrou vypovídací hodnotu. V již zmíněném experimentu (Soulis a kol. 2017) na řecké univerzitě byl zaznamenán největší jednorázový odtok u lyzimerů bez vegetačního pokryvu. Nejnižší snížení odtoku, pouze 2 %, bylo zaznamenáno u hloubky substrátu 16 cm bez osázení. Lyzimetr s hloubkou substrátu 8 cm dopadl překvapivě při stejné srážce o něco lépe a snížení odtoku zde dosáhlo 6 %. Tento jev byl ovšem způsoben rozdílem vlhkostí substrátů před začátkem srážky. Hlubší substrát (16 cm) měl vlhkost 54,8 % a mělčí (8 cm) vlhkost 49,7 %. Na odtok je tedy třeba pohlížet společně s ostatními faktory a je nutné brát v úvahu i počáteční podmínky (Soulis a kol. 2017).

Obdobně je i z experimentu (Carson a kol. 2013) na columbijské univerzitě vidět rozdíl mezi hodnotou ročního odtoku a odtoky jednotlivými. Při měření a následném vyhodnocení byla data nejprve rozdělena do jednotlivých srážkových událostí. Jednotlivé srážkové události byly v této studii ohraničeny časovým intervalem 6 hodin bez deště. Srážka se započítává od začátku deště a končí, pokud dalších 6 hodin není zaznamenána žádná srážka ani odtok. Redukce jednotlivých odtoků se pohybovala v rozmezí od 3 do 100 % u (1) na budově Kolumbijské univerzity, 9-100 % u (2) na budově centra pošty a 20-100 % u (3) na budově ConEdison. Neočekávaným zjištěním byl modulový systém (3) při posuzování jednotlivých srážek. Při malé srážce 0-10 mm byla redukce odtoku menší než u systému (2) na budově centra pošty. Při srážce 10-20 mm dopadl dokonce nejhůře ze všech tří pozorovaných střech. Naproti tomu při větších srážkách, 50 mm a více, byla redukce odtoku

modulovým systémem (3) nejvyšší. Při srážkách nad 50 mm střechy průměrně zadržely (1) 21 %, (2) 26 % a (3) 34 % vody. Měřené výsledky tedy naznačují, že na redukci odtoku mají velký vliv i jiné parametry než hloubka substrátu, což je mnohdy uváděno jako hlavní parametr pro posouzení.

Sněhota a kol. 2021 uskutečnili experiment, porovnávající odtokové poměry zelených střech s různými pěstebními substráty a pokryvností vegetace. Experiment byl realizován na střeše budovy UCEEB (ČVUT) v Buštěhradě v České republice. Podnebí je zde mírné, průměrná roční teplota 8 °C a průměrný roční úhrn srážek 500 až 550 mm. Pro měření byly využity čtyři zkušební záhony o velikosti 1x1 m se substráty ACRE a BB Com. Stejně substráty byly měřeny i v této bakalářské práci (viz kapitola 4.24.1). Experimentem byly zjištěny významné rozdíly v množství odtoku v závislosti na využitém substrátu. Dalším zjištěním byl vliv vegetace, kdy záhony s vysokou pokryvností zadržely více vody. Lepší retence byla zaznamenána u záhonu osázeného kobercem z rozchodníků nežli pouze pomocí odřezků. Potvrdili také fakt, že zvýšená počáteční vlhkost vede ke snížení schopnosti retence.

#### 3.2.4 Faktory ovlivňující odtok

Odtok vody a účinnost zelené střechy závisí na mnoha faktorech. Vliv hraje například mocnost substrátu, druh vegetace a její hustota pokrytí, sklon střechy, vrstvy vegetačního souvrství, klimatické podnebí, počáteční vlhkost substrátu či celkové množství srážek (Burian a kol. 2019, Soulis a kol. 2017). Carson a kol. 2013 při experimentu v New Yorku poukazují i na další možné faktory, které je třeba vzít v úvahu. Porovnávají klimatické údaje v měřeném roce s dlouhodobým průměrem. Pro tento experiment byly použity historické klimatické údaje z meteorologické stanice Belvedere Castle v Central Parku v New Yorku za posledních 40 let. Při porovnání množství srážek autoři zmiňují, že celková retence ze střech (1) na budově Kolumbijské univerzity a (2) na budově centra pošty za sledované období je nižší než za typický rok. Jiné, sušší roky, by snížení odtoku mohlo být i vyšší. Faktor hraje i uspořádání nevegetačních ploch. Pokud je voda z nevegetačních ploch svedena rovnou do střešních svodů, nedostane se do sousední vegetace vůbec. Na nevegetačních plochách je třeba počítat s možností výparu. Další vliv na odtok může mít technologie drenáže. U střechy (2) na centru pošty je plocha pro odtok souvislá. U střechy na budově ConEdison (3) je odtok řešen několika otvory na dně každého instalovaného zásobníku. Pokud u paty otvoru nastane omezení odvodnění, mohou mít preferenční cesty odtoku menší vliv na odtok a substrát při velkých srážkách zadrží více vody. Závěrečné srovnání ukazuje vyšší retenci vody u systémů (2) na střeše centra pošty a (3) na střeše ConEdison především kvůli větší hloubce substrátu. Závěrem studie autoři (Carson a kol. 2013) poukazují na fakt, že celková retence i u stejných technologií zelených střech nemusí mít vždy stejnou výkonnost vlivem především způsobu instalace nebo uspořádáním nevegetačních ploch. V konečném důsledku má na množství odtoku vliv i teplota a barva substrátu. Pokud má záhon menší pokryvnost

vegetací, bývají zde měřeny vyšší teploty. Sluneční záření lépe proniká do substrátu přes tmavé neosázené plochy mezi rostlinami (Sněhota a kol. 2021).

### 3.2.5 Změna odtoku v čase vlivem pedogeneze a pokrývnosti vegetací

Vlastnosti antropogenních půd se mohou zhoršit, pokud dojde během času ke změně struktury vrchní vrstvy půdy. Struktura půdy je zpočátku nestabilní a časem se mění především vlivem růstu kořenů, dopadem srážek, hnojením půd či přítomnosti vodních par. Jelínková a kol. (2016) sledovali ranou fázi pedogeneze antropogenních půd. Je sledováno ovlivnění vodního a tepelného režimu v období od založení zelené střechy do konce druhého vegetačního období. Změny půdních struktur byly pozorovány rentgenovou počítačovou tomografií. Byly testovány dva druhy půdních substrátů s rozdílnými vlastnostmi. Experiment proběhl rovněž na střeše budovy UCEEB (viz Sněhota a kol. 2021). Pro experiment byly vybudovány 2 vyvýšené zkušební záhony 1 x 1 m s hloubkou 10 cm a sklonem 2 % simulují typickou zelenou extenzivní střechu. Byl měřen odtok ze zkušebních ploch a místní meteorologické podmínky. První záhon s označením S1 je naplněn substrátem s hloubkou 5 cm. Substrát tvoří sejmutá ornice a příměs drceného keramzitu a cihel. Druhý záhon s označením S2 je naplněn jiným substrátem také s hloubkou 5 cm. Jde o lehký substrát Optigreen Type E (směs expandované břídlíce, lávy, pemzy, keramzitu, drcených cihel a kompostu ze zeleného odpadu). Pro sledování tvorby půdy byly pravidelně odebírány neporušené vzorky. Pokrývnost vegetací byla snímkována každý týden. Záhon S1 byl osázen rozprostřením velkého množství řízků rozchodníků. Byl zde pozorován rychlejší růst rostlin. Pokrývnost zde dosahovala asi 55 %. U záhonu S2, který byl osázen jednotlivými kusy rozchodníku, dosáhla pokrývnost pouze 30 %. Při chladných měsících bylo pozorováno snížení pokrývnosti vždy okolo 12 %. Během sledované doby se měnila schopnost redukce odtoku. Podle pozorování při experimentu v době vegetačního období 2014 (září až říjen) činil odtok u vzorku S1 38 % a u S2 63 % (Jelínková a kol. 2015). Ve vegetačním období 2015 se již odtok snížil na hodnoty 23 % a 43 % pro S1 a S2. Rentgenovou počítačovou tomografií se prokázaly strukturální změny především v půdě S1. Půda vykazuje časem vysoké hodnoty zhutnění a probíhá zde přesun jílových částic do hlubších vrstev. V porovnání je tedy vzorek S2 časově stabilnější. Snížení odtoku je způsobeno kombinací jiných srážkových úhrnů každý rok, hustší pokrývností vegetace ale také změnou struktury půdního substrátu. (Jelínková a kol. 2016).

### 3.2.6 Význam odtokového součinitele v praxi a metody jeho stanovení

Hodnota odtokového součinitele je důležitá pro technický návrh staveb a odvodňovacích systémů. Hraje roli při návrhu odvodnění střech, kapacity svodů a v důsledku i dimenzování kanalizací (Burian a kol. 2019). Ministerstvo životního prostředí proto poskytuje v rámci nového dotačního programu „Nová zelená úsporám“ dotace pro úsporné bydlení, mimo jiné i na výstavu zelených střech. Dotace

je poskytována pro vegetační střechy extenzivní, polointenzivní a intenzivní. Střecha musí aktuálně splňovat podmínky uvedené v dokumentu „Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory programu Nová zelená úsporám v rámci Národního plánu obnovy“ platného od 1. 4. 2022. Dotace stanovuje výši podpory na m<sup>2</sup>, například pro ploché střechy extenzivní činí dotace 700 Kč/m<sup>2</sup>. Střecha musí být navržena v souladu s dokumentem „Standardy pro navrhování, provádění a údržbu – Vegetační souvrství zelených střech“ a musí splňovat požadavek na minimální odtokový součinitel C. Ve zmíněném dokumentu dotačního programu je uvedena hodnota pro extenzivní ploché střechy „ $C \leq 0,55$ “. Pro plochy šikmé se sklonem nad 12 ° je stanovena hodnota „ $C \leq 0,7$ “. Z pokynů ale není jasné, o který součinitel odtoku se jedná. Pokud by se jednalo o hodnotu C, tedy špičkový odtok, měly by být definovány např. parametry návrhové srážky (Státní fond životního prostředí ČR, Nová zelená úsporám 2022).

Existuje několik postupů je stanovení C. Podle směrnice pro navrhování zelených střech (FLL guidelines) musí měření odtokového součinitele C probíhat za splnění přesně daných podmínek. Jsou zde definovány přesné rozměry zkoušeného vzorku, sklon plochy, způsob a intenzita zavlažování nebo způsob měření odtoku. Vzorek půdy musí být pro správné stanovení C předem nasycený vodou a tento proces je po určitém časovém intervalu několikrát opakován pro dosažení počáteční vlhkosti. Součinitel C se vypočítá jako podíl objemu odtoku v litrech za 15 minut ku objemu deště v litrech za 15 minut. Výslednou hodnotou součinitele C je průměr ze tří měření. Pro stanovení roční retence by dokonce mělo pozorování probíhat po dobu 4 let, aby bylo možné stanovit dostatečně reprezentativní hodnotu.

Množství odtoku a stanovení odtokového součinitele má i ekonomický dopad při platbě stočného. To musí momentálně platit všechny veřejné a komerční budovy podle rozměrů střechy a množství svedené vody. Výpočet množství srážkových vod odváděných do kanalizace se řídí přílohou č. 16 k vyhlášce č. 428/2001 Sb. zákona o vodovodech a kanalizacích. Odtokový součinitel se vybírá podle druhu plochy. Pro plochy nepropustné (asfaltové, betonové plochy, zámkové dlažby...) je odtokový součinitel roven hodnotě 0,9. Pro plochy zpevněné propustné (štěrk) 0,4 a pro plochy kryté vegetací (sady, hřiště, zahrady...) je hodnota součinitele 0,05. Parametry zelených střech nespádají do žádné ze stávajících kategorií. Při výpočtu se také zohledňuje dlouhodobý srážkový normál pro danou oblast v období alespoň 30 let, který poskytuje ČHMÚ (Příloha č. 16 k vyhlášce č. 428/2001 Sb). Ministerstvo zemědělství navrhuje k 1. 9. 2022 změnu vyhlášky, která by budovy se zelenou střechou zvýhodnila a motivovala k plánování nových projektů zahrnujících tuto technologii (Naše voda 2021).

### 3.3 Shrnutí rešerše

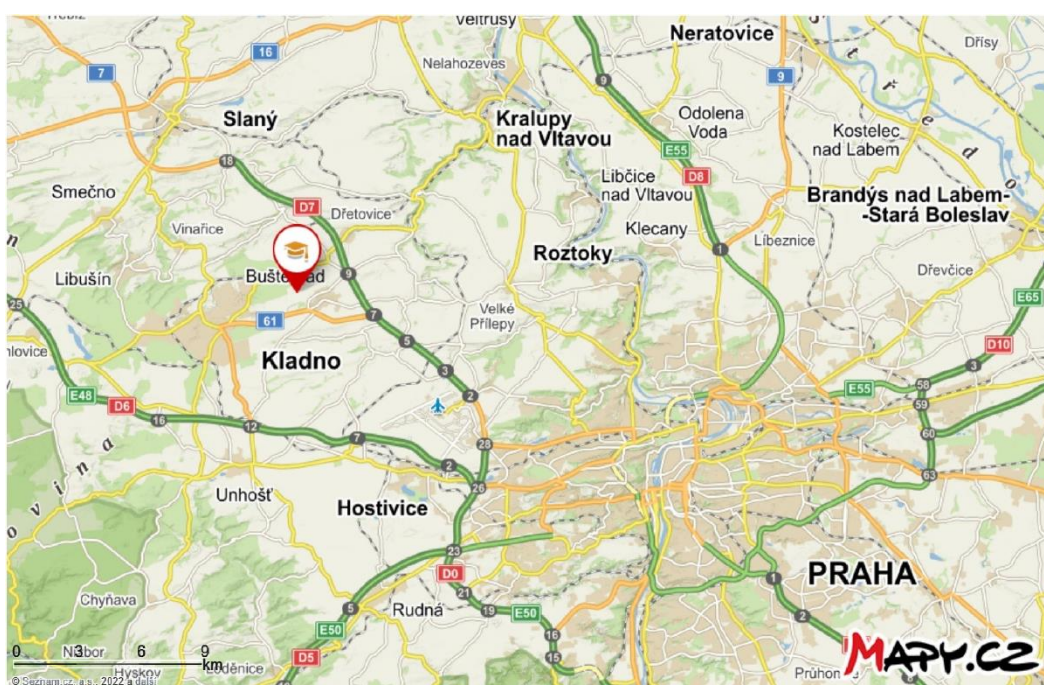
Rešerše shrnuje informace o měření odtoku ze zelených střech. Účinnost dané plochy není jednoduché určit a vliv hrají nejrůznější podmínky. Ze shrnuté literatury vyplývá, že největší vliv na výsledný odtok vody má hloubka substrátu, počáteční nasycení vodu, pokrývnost vegetací, složení substrátů ale i mnoho dalších faktorů. Například technický návrh střechy včetně řešení technologie pro odtok či umístění nevegetačních ploch či volba materiálů. Přesné matematické vztahy, jak silně zmíněné veličiny na odtok působí, ale známy nejsou. Např. i hloubka substrátu může vždy mít odlišný vliv a to v závislosti na množství napadlých srážek. Toto potvrzují i výsledky experimentu Carsona a kol. 2013. Pro správné zjištění odtokového součinitele je třeba měření realizovat opakovaně za přesně daných podmínek. Součinitel odtoku jinak nemusí být pro jednu skladbu zelené střechy konečné číslo, bude se lišit především v závislosti na počátečních vlhkostech substrátů, může se časem měnit i např. kvůli měnícím se vlastnostem půdy. Stejně řešení zelené střechy nebude tedy mít stejnou účinnost na 2 různých místech.



## 4 Materiály a metody

### 4.1 Charakteristika lokality

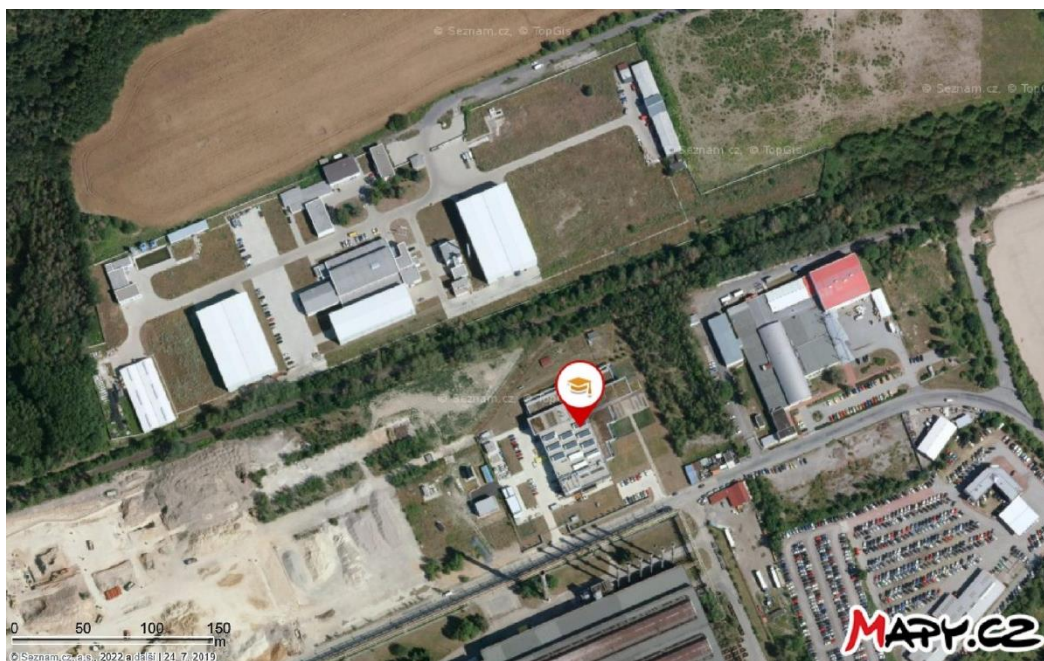
Demonstrační experiment s měřením odtoku probíhal na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB) v Buštěhradě (50° 9.41797' s. š., 14° 10.19195' v. d., 355 m n. m.). Místo experimentu je zobrazeno na obr. 4.1. Oblast spadá do klimatického regionu teplý, suchý a nachází se v mírném pásu. Nejbližší meteorologická stanice se nachází v Praze v Ruzyni. Od budovy UCEEB je vzdálená 8,8 km. Z meteorologické stanice byly zjištěny dlouhodobé průměry v letech 1991–2020. Průměrná roční teplota vzduchu byla 9 °C a průměrný roční srážkový úhrn byl 495,1 mm (dlouhodobý průměr v období 1991–2020, Český hydrometeorologický ústav; klimatické regiony, Vumop, 2022).



Obr. 4.1 Umístění budovy UCEEB (zdroj mapy.cz)

Jedná se o administrativní budovu se zaměřením na výzkum udržitelných budov. Tato budova vznikla na pozemku bývalého brownfieldu. Letecký snímek zachycující nejbližší okolí budovy je zobrazen na obr. 4.2. Experiment byl realizován v návaznosti na projekt „Projekt výzkumu a rozvoje – výzkum souvrství extenzivních zelených střeš“, společný výzkumný projekt s firmou Metrostav.

V roce 2017 zde bylo na střeše nad administrativní částí budovy zhotoveno 8 zkušebních ploch o rozměrech 3 x 10,5 m. Střecha je ve výšce 10,3 m nad terénem, nachází se nad druhým nadzemním podlažím. Zkušební plochy jsou vyvýšené o 80 mm nad úroveň střechy kvůli možnosti měření odtoku vody. Mezi jednotlivými experimentálními plochami je vybudován chodník a zbytek střechy je zasypan kačírkiem (Hanzlíková a kol. 2018).



Obr. 4.2 Letecký snímek budovy UCEEB a nejbližšího okolí (zdroj mapy.cz)

## 4.2 Popis ploch a použitých substrátů

Měření odtoku v rámci této bakalářské práce probíhalo na šesti zkušebních plochách označených I-2, I-3, I-5, I-6, I-7 a I-8. Římská I v názvu plochy označuje etapu výstavby v rámci celého projektu, arabská číslice značí konkrétní plochu. V tab. 4.1 je uvedena bližší specifikace využitých souvrství.

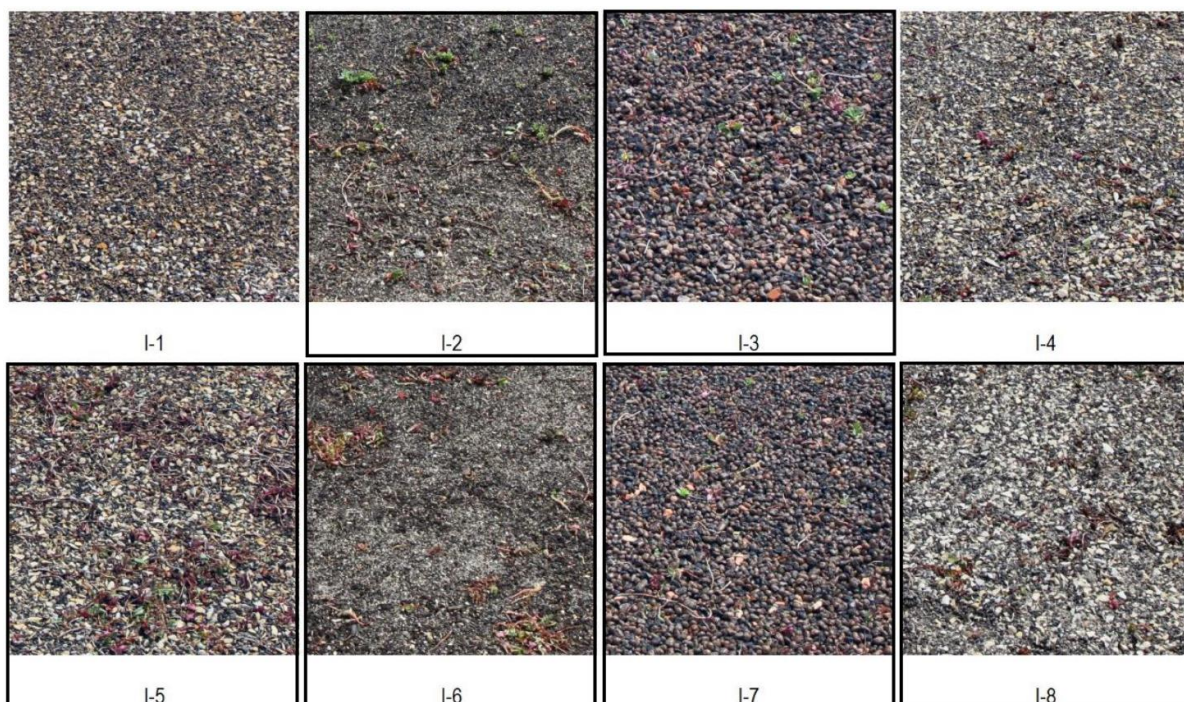
Tab. 4.1 Specifikace souvrství ploch na střeše UCEEB (upraveno z Hanzlíková a kol. 2018)

Plocha	Specifikace
I-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Směs suchomilných rostlin (rozchodníky, netřesky)</li> <li>• Zemina pro zelené střechy Rašelina Soběslav a.s. 60 mm</li> <li>• Separáční textilie 100 g/m<sup>2</sup></li> <li>• Kalíšková (nopov�) fólie</li> <li>• Ochrann� geotextilie min 300 g/m<sup>2</sup></li> </ul>
I-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Směs suchomilných rostlin (rozchodníky, netřesky)</li> <li>• Zemina pro zelen� střechy BBCom, 60 mm</li> <li>• Separáční textilie 100 g/m<sup>2</sup></li> <li>• Kalíšková (nopov�) fólie</li> <li>• Ochrann� geotextilie min 300 g/m<sup>2</sup></li> </ul>
I-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Směs suchomilných rostlin (rozchodníky, netřesky)</li> <li>• Střešní substrát ACRE Extensiv 60 mm</li> <li>• Separáční textilie 100 g/m<sup>2</sup></li> <li>• Kalíšková (nopov�) fólie</li> <li>• Ochrann� geotextilie min 300 g/m<sup>2</sup></li> <li>• plocha bez �držby</li> </ul>
I-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Shodn� s plochou I-2, bez �držby</li> </ul>
I-7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Shodn� s plochou I-2, bez �držby</li> </ul>
I-8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Směs suchomiln�ch rostlin (rozchodn�ky, netřesky, byliny)</li> <li>• Střešn� substr�t ACRE Extensiv 70 mm</li> <li>• Smyčkov� rohoř min 300 g/m<sup>2</sup></li> </ul>

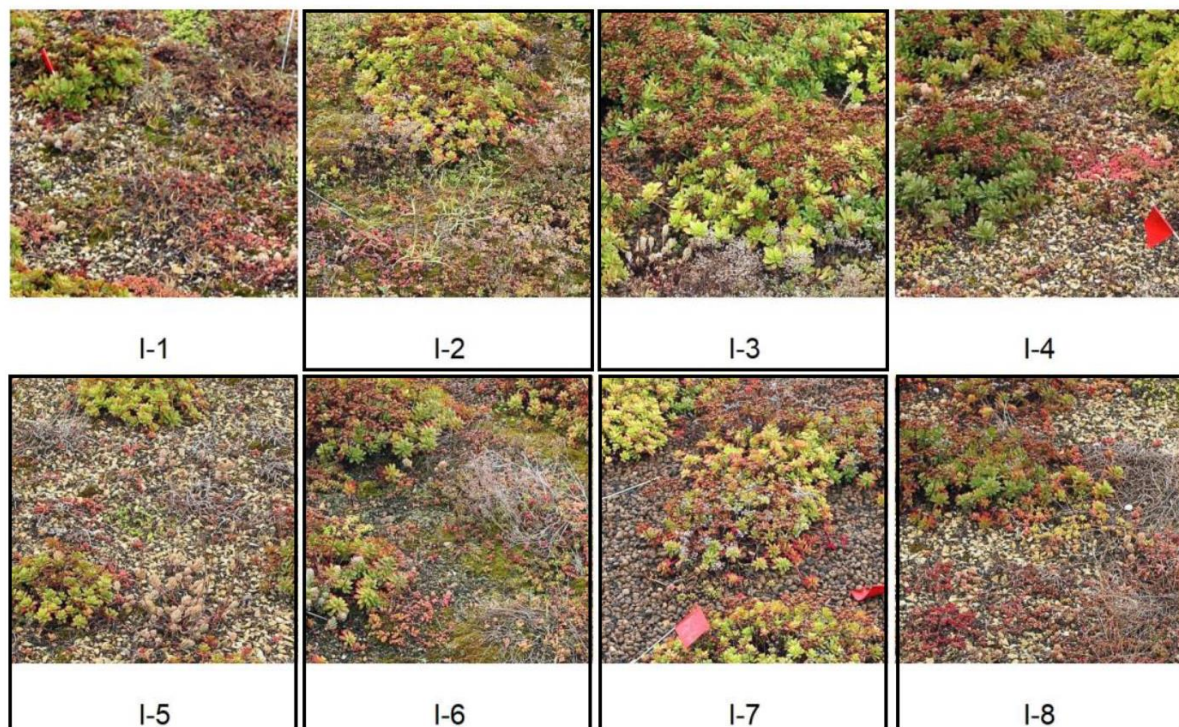
Na plochách I-5 a I-8 byl využit substrát ACRE Extensiv, 60 mm resp. 70 mm. Jde o směs drceného spongilitu, expandovaného jílu, rašeliny a zeminy. Na plochách I-2 a I-6 je umístěna zemina pro zelen  střechy Rašelina Soběslav a.s., 60 mm, kter  je vyrobena z tříděn  rašeliny, k rov ho kompostu a proset  škv ry. Plochy I-3 a I-7 jsou vyplněny zeminou pro zelen  střechy FLORCOM SSE, 60 mm od firmy BB Com. Směs je tvořena drcen m lioporem (lehk  keramzit), cihelnou drt  a zelen m kompostem a rašelinou. Všechny substráty jsou komerčně dostupn  od českých v robc .

U ploch s poznámkou „bez údržby“ se po ukončení dokončovací fáze nechala střecha přirozenému vývoji. Pravideln  zálivka, v řiva a odstraňování plevel  probíhaly pouze do té doby, neř růst vegetace dosáhl pořadovan ho stavu. Dále se plochy nechaly bez údržby, maxim ln  p c  je posečení vysokého plevelu jednou za rok. V rámci experimentu byly pozorovány vřdy 2 plochy se stejn m substrátem, rozdíl byl v jejich udrřov n .

Na obr. 4.3 je vidět detail vřech 8 experimentálních ploch a jejich substrátů zde dne 25. 5. 2018 tedy krátce po založení ploch, ve stavu s dosud málo vyvinutou vegetací. Na obr. 4.4 je vidět detail ploch ze dne 30. 8. 2021, coř odpovídá p ibliřn  době experimentu. Plochy, na kterých se provádělo měření, jsou označeny černými rámečky.



*Obr. 4.3 Fotografie substrátů jednotlivých ploch, dne 25. 5. 2017 (zdroj archiv UCEEB ČVUT)*



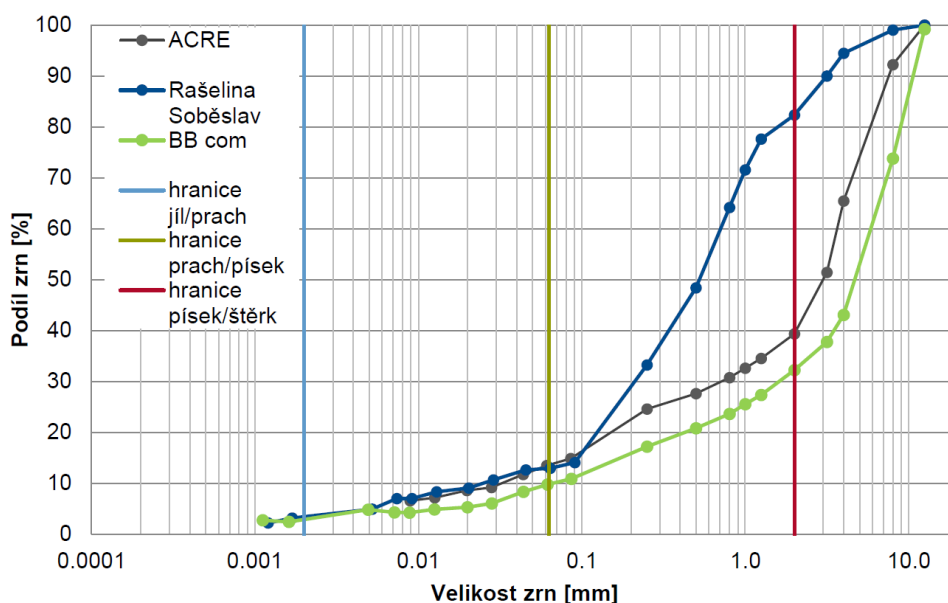
*Obr. 4.4 Fotografie substrátů jednotlivých ploch, dne 30. 8. 2021 (zdroj archiv UCEEB ČVUT)*

Při budování střechy bylo u jednotlivých substrátů zjištěné zrnitostní složení. Na základě prosévací a hustoměrné zkoušky byla sestavena čára zrnitosti a tím zjištěné procentuální zastoupení jednotlivých frakcí. Čáry zrnitostí pro jednotlivé druhy substrátů jsou zobrazeny na obr. 4.5.

Na základě provedených zkoušek můžeme říci, že substrát Rašelina Soběslav obsahuje až 33 % jemných částic menších než 0,25 mm, což je v porovnání z ostatními substráty nejvyšší zastoupení jemnozrnné složky. Substrát ACRE obsahuje jemných částic 24,6 % a BB Com pouze 17,2 %.

Při realizaci střechy byla u jednotlivých substrátů stanovena i maximální vodní kapacita podle standardizovaných FLL zkoušek (FLL 2008). Maximální vodní kapacita je charakterizována rozdílem hmotností standardně nahutněného vzorku plně nasyceného a vzorku suchého ku objemu vzorku.

Maximální vodní kapacita u substrátu ACRE dosahovala v roce 2018 40 % (tj. 40 % plně nasyceného vzorku tvoří zadržaná voda, zbylých 60 % představuje sušina), u substrátu BB Com 28-37 % a u substrátu Rašelina Soběslav 51-58 %. V roce 2021, kdy byly hodnoty opětovně stanoveny na vzorcích odebraných ze zkušebních ploch a nahutněny pro potřeby zkoušky, se hodnoty maximální vodní



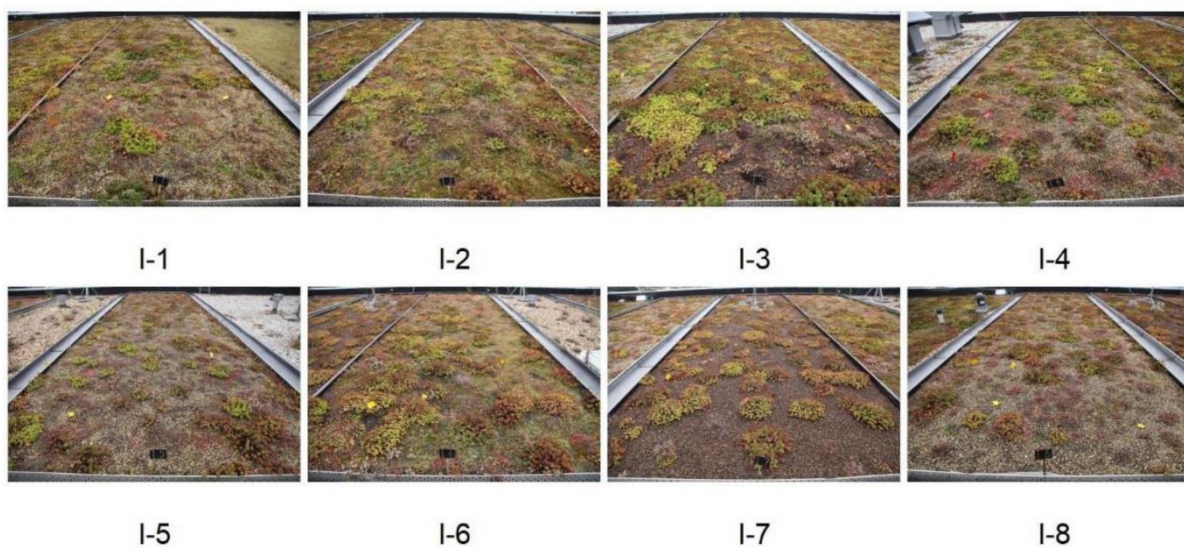
Obr. 4.5 Zrnitostní složení střešních substrátů (zdroj archiv UCEEB ČVUT)

kapacity zvýšily, u substrátu ACRE dosahovala kapacita průměrně hodnoty 64 %, Rašelina Soběslav 77 % a BB Com 47 %. Substrát ACRE je nejsvětější barvy (Rybová a kol. 2021).

### 4.3 Vegetace

Jednotlivé plochy byly osázeny směsí druhů rozchodníků. Rozchodníky byly sázeny formou rozchodníkových řízků a následně tlačeny hlouběji do substrátu pro lepší zakořenění. Dne 16. října 2017 bylo nasbíráno celkem 38,4 kg rozchodníkových řízků na pěstební zahradě společnosti ACRE u Prahy. Jednalo se o druhy rozchodníků: *Sedum reflexum*, *S. sediforme*, *S. roseum*, *S. album*, *S. spurium*

*album*, *S. sp. Purpurteppich*, *S. selskianum regelend mack* a *S. hybridum*. Větší rostliny rozchodníků byly rozstříhány na části nůžkami a následně byla směs rozdělena na 8 stejných dílů a rozmístěna na jednotlivé plochy. Po osázení byly plochy pravidelně zalévány až po dobu lepšího zakořenění a uchycení rostlin. 29. října zasáhla střechu silná vichřice a část rozchodníků byla větrem odnesena pryč ze střechy. Dále i v důsledku následující nízkých teplot, kdy byl první mráz pozorován 22. 11. 2017, nebylo ozelenění střechy příliš úspěšné. V květnu roku 2018 proto proběhlo nové osázení za spolupráce firmy ACRE. Střecha byla osázena dalšími 35 kg rozchodníků (*S. hybridum*, *S. selskianum*, *S. sp. Album*, *S. Sexangulare*, *S. kamtschatikum* a *S. album chloroticum*). V jaké stavu se střecha nacházela 30. 8. 2021, což bylo jen několik dní před uskutečněním experimentu, lze vidět na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Stav střechy ze den 30. 8. 2021 (zdroj archiv UCEEB ČVUT)

Procento pokryvnosti vegetací je důležitým faktorem pro redukci odtoku. Koncem září 2021 proběhlo snímkování experimentálních ploch pomocí dronu. Focení probíhalo oblačný den, aby na fotkách nebyly vidět stíny rostlin, či okolních technických zařízení. Ze snímků byla určena vegetační pokryvnost, která je pro zkoumané plochy prezentována v následující tab. 4.2.

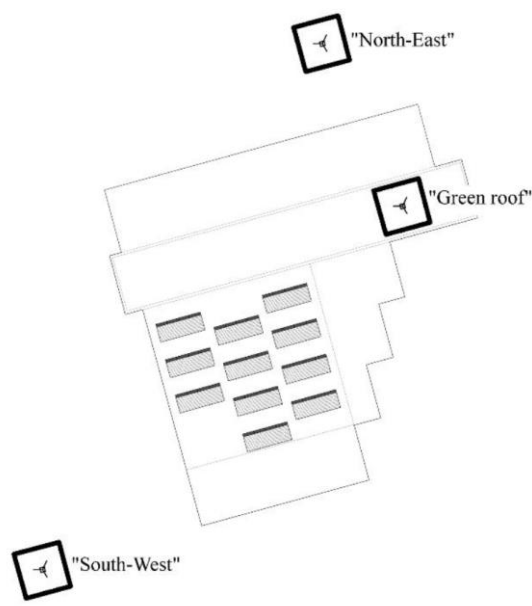
Tab. 4.2 Vegetační pokryvnost experimentálních ploch (upraveno z Rybová a kol. 2021)

Plocha	Substrát	Vegetační pokryvnost (%)
I-2	Rašelina	92.34
I-3	BB Com	66.37
I-5	ACRE	40.76
I-6	Rašelina	88.99
I-7	BB Com	41.24
I-8	ACRE	32.62

Střechy jsou umístěny na slunečném a větrném místě, proto zde nedochází k přílišnému růstu plevelných druhů vegetace. Výjimkou jsou plochy se substrátem Rašelina Soběslav, kde je organický substrát pokryt mechem, a proto zde pokryvnost dosahuje až 92 %, protože i mech byl započítán jako plocha pokrytá vegetací. U neudržovaných ploch je pokryvnost obecně menší.

#### 4.4 Meteorologická stanice

Přímo na střeše těsně vedle experimentálních ploch se nachází místní meteorologická stanice (50°09'25.0"N 14°10'12.1"E) pro měření vnějších podmínek při experimentu. Stanice stojí přímo na kačírkovém zásypu (v nadmořské výšce 365,3 m n. m.), jež obklopuje zkušební plochy. V okolí budovy UCEEB jsou celkem stanice umístěny 3 (viz obr. 4.7), data byly brány ze stanice „Green roof“, která byla zprovozněna 3. července 2014. Stanice měří relativní vlhkost vzduchu, teplotu vzduchu, tlak vzduchu, rychlost a směr větru (Sněhota a kol. 2015).



Obr. 4.7 Polohy meteostanic na střeše a v okolí budovy UCEEB (převzato z Sněhota a kol. 2015)

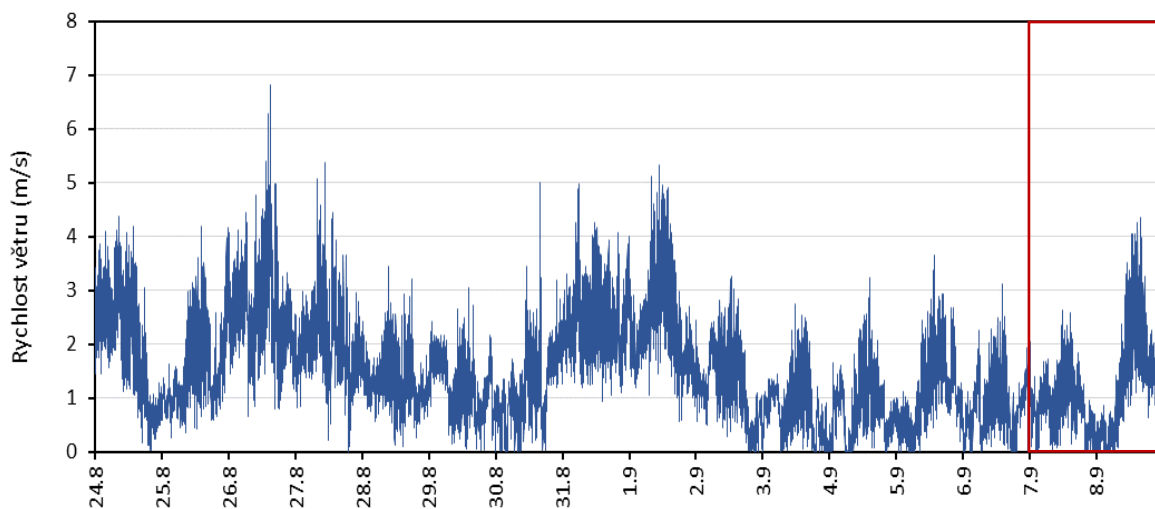
#### 4.5 Popis experimentu

Skrápěcí experiment měl za cíl změřit odtok z ploch I-2, I-3, I-5, I-6, I-7 a I-8. Různé substráty a počáteční vlastnosti způsobí odlišný odtok. Experiment byl na každé ploše proveden jednou, pro jednu konkrétní počáteční podmínku. Jde tedy o experiment demonstračního charakteru, který umožní porovnání některých charakteristik odtoku ze střech různých souvrství, který ale zároveň nepostihuje celou komplexní problematiku odtoku ze zelených střech. Na základě změřených hodnot lze stanovit odtokový součinitel a posuzované plochy tak porovnat. Na skrápěcím experimentu se podíleli: Michal Sněhota, Barbora Rybová, Petra Hečková, Marek Petreje a autorka této bakalářské práce, Eliška Johanisová.

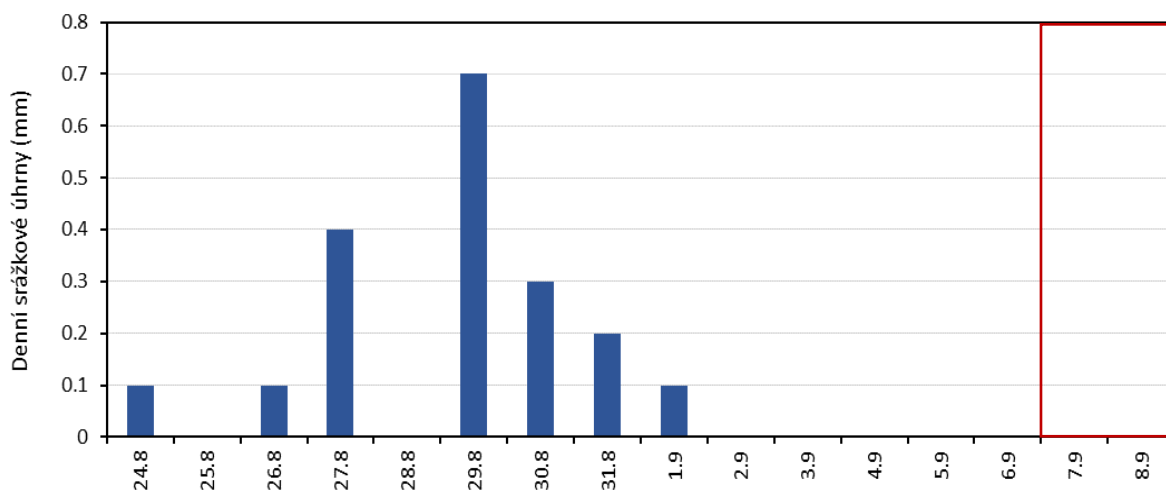
##### 4.5.1 Klimatické podmínky

Experiment probíhal na střeše UCEEBu ve dnech 7. a 8. 9. 2021. Oba dny bylo počasí bez deště. Z údajů z meteorologické stanice byly vyhodnoceny denní srážkové úhrny, rychlosti větru, teploty a relativní vlhkosti vzduchu z období 14 dní před experimentem (obr. 4.8, obr. 4.9, obr. 4.10 a obr. 4.11). Dny, kdy experiment probíhal jsou v grafech vyznačeny rámečkem. Tyto údaje jsou důležité kvůli představě o nasycenosti střech před provedením experimentu. Z údajů o denních srážkových úhrnech (obr. 4.9) lze vidět, že 5 dní před měřením nebyla zaznamenána žádná srážka. Lze předpokládat, že souvrství střech tedy nebyly příliš nasycené. Déle bylo provedeno podrobné měření vlhkostí substrátů těsně před začátkem skrápění. První den 7. 9. 2021 experimentu bylo počasí slunečné. Při skrápění foukal slabší vítr o průměrné rychlosti 1,25 m/s a teplota dosahovala 23°C. Druhý den bylo na začátku měření počasí mírně větrné, během dne vítr sílil, průměrně při skrápění ploch tento den foukal vítr o rychlosti 2,06 m/s.

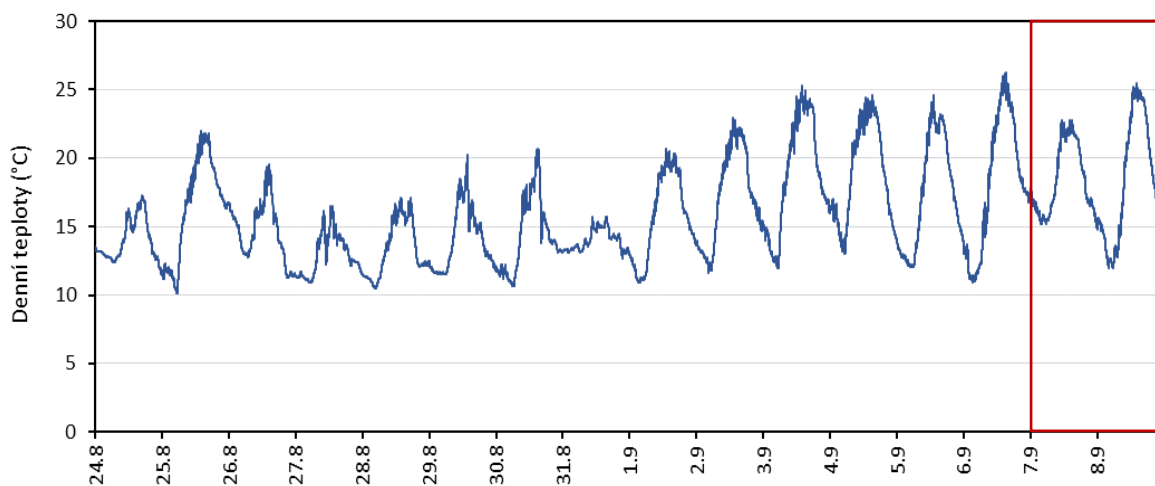




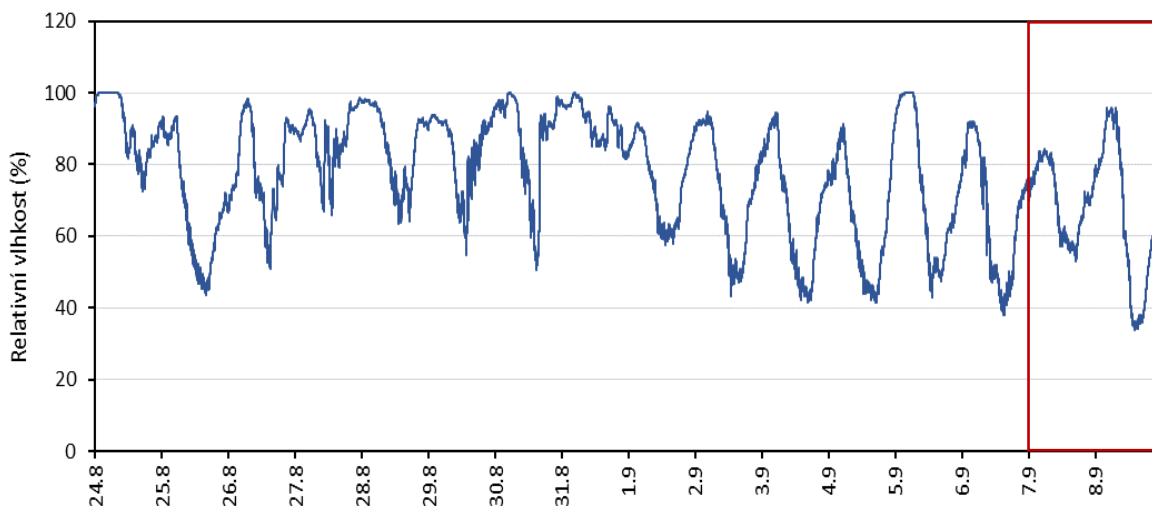
Obr. 4.8 Rychlosti větru zaznamenané 14 dní před experimentem meteorologickou stanicí (zdroj archiv UCEEB ČVUT)



Obr. 4.9 Denní srážkové úhrny zaznamenané 14 dní před experimentem meteorologickou stanicí (zdroj archiv UCEEB ČVUT)



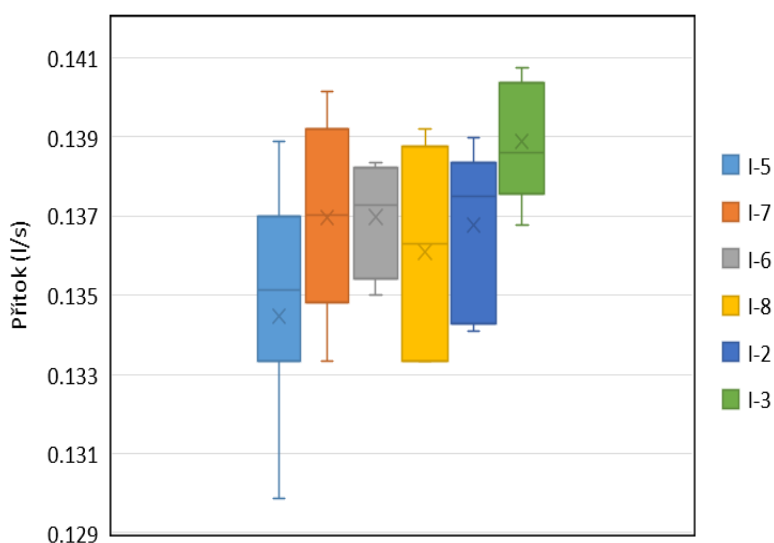
Obr. 4.10 Teploty vzduchu ve 2 m nad střechou zaznamenané 14 dní před experimentem meteorologickou stanicí (zdroj archiv UCEEB ČVUT)



Obr. 4.11 Relativní vlhkosti vzduchu zaznamenané 14 dní před experimentem meteorologickou stanicí (zdroj archiv UCEEB CVUT)

#### 4.5.2 Rozkolísanost přítoku

Každá experimentální plocha byla postupně uměle zavlažována zahradním postřikovačem, který byl umístěn uprostřed plochy. Postřikovač byl připojen hadicí k rozvodu vody, který je vyústěn na střeše budovy. Jako první byl testován dostatečný tlak pro správnou funkci postřikovače. V minulosti tlak vody kolísal a přítok vody nebyl plynulý. Proto jsme na začátku otestovali i alternativní způsob čerpání vody čerpadlem z nádoby na střeše. Od tohoto způsobu ale bylo nakonec možné upustit, přítok se po celou dobu experimentu pohyboval mezi 0,13 až 0,14 l/s, což lze považovat za stabilní průtok. Na následujícím obr. 4.12 je vidět porovnání přítoků vody do postřikovače, které byly zaznamenány při skrácení jednotlivých ploch. Měřená data z experimentu na ploše I-5 byla očištěna o odlehlé hodnoty. Pouze ve 2 případech se zde jednalo o významnější odchylku, nejspíše se ale jednalo o chybu měření.



Obr. 4.12 Celkový rozsah měřených přítoků při skrácení jednotlivých ploch

Křížek v krabicovém grafu zobrazuje průměrnou hodnotu, vodorovná čára hodnotu mediánu. Okraje „krabice“ značí 25 a 75 % kvantil, úplný okraj pak horní a dolní mez vnitřních vazeb, resp. maximální a minimální pozorovanou hodnotu.

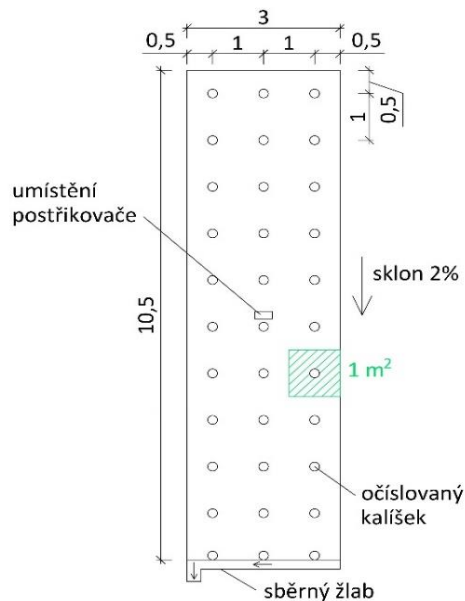
Přítok vody byl měřen průtokoměrem (obr. 4.13), který byl instalován mezi rozvodem vody a zahradním postřikovač. Během skrápění všech ploch bylo pravidelně odečítáno množství proteklé vody na průtokoměru, zapisováno a následně přepočítáváno na hodnotu průtoku. Během prvního měření byla tato hodnota měřena velmi pečlivě, přesný čas byl zapisován vždy, když se hodnota na průtokoměru změnila o 10 litrů. Při dalších měření byla tato hodnota odečítána v intervalu cca 10 minut.



Obr. 4.13 Průtokoměr

#### 4.5.3 Měření úhrnu srážky

První den experimentu bylo provedeno zkušební měření a proveden experiment na ploše I-5 a I-7. Druhý den byly naměřeny zbylé plochy I-6, poté I-8, I-2 a nakonec I-3. Nejprve bylo třeba správně nastavit intenzitu a dostřik zahradního postřikovače a ověřit funkci plastových kalíšků. Toto ověření bylo provedeno před měřením první plochy. Plošná distribuce úhrnu srážek byla měřena pomocí rastru plastových kalíšků. Kalíšky o průměru 94 mm a ploše 6940 mm<sup>2</sup> byly nejprve očíslovány a následně rozmístěny na zkušební plochu ve sponu 1 metr, rozmístění tedy odpovídalo 1 kalíšek na 1 m<sup>2</sup>. Pouze na spodním okraji střechy jsou kalíšky rozmístěny těsně u sběrného žlabu a plocha tak odpovídá cca 0,5 m<sup>2</sup>. Umístění kalíšků je zřejmé z obr. 4.14.



Obr. 4.14 Rozmístění kalíšků na zkušební plochu (rozměry v m)

Kalíšky byly po konci zavlažování zváženy a s údaji o rozměrech kalíšku již bylo možné hmotnost vody přepočítat na úhrn srážky, viz rovnice [1] a [2]. Pokud se kalíšek naplnil celý již v průběhu experimentu, vyměnil se za prázdný a hodnota se počítala jako součet dílčích hmotností.

$$V = \frac{m}{\rho} \cdot 10^6 \quad [1]$$

$$\text{úhrn} = \frac{V}{S} \quad [2]$$

$V$  ... objem vody v kalíšku [ $\text{mm}^3$ ]

$m$  ... váha vody v kalíšku [g]

$\rho$  ... hustota vody [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$S$  ... plocha dna kalíšku [ $\text{mm}^2$ ]

úhrn ... srážkový úhrn za dobu trvání srážky [mm]

Kalíšky byly zatíženy kovovou podložkou (obr. 4.15). Podle množství zachycené vody v kalíšku se určil srážkový úhrn reprezentující daný  $1 \text{ m}^2$ . Následně se pro každou plochu spočetl aritmetický průměr úhrnů srážek napadlých na daný  $1 \text{ m}^2$  za dobu zavlažování. Získali jsme tak průměrný úhrn srážky pro každou plochu. Údaje o srážkách napadlých na okraj plochy, kde kalíšek reprezentuje pouze  $0,5 \text{ m}^2$  se

zjednodušil a hodnota se také počítala na 1 m<sup>2</sup>. Všechny kalíšky se do výpočtu aritmetického průměru braly se stejnou váhou. Jelikož do okrajových kalíšků většinou napadlo pouze malé množství vody, velké chyby jsme se tímto zjednodušením nedopustili.



Obr. 4.15 Plastový kalíšek zatížený kovovou podložkou (zdroj archiv UCEEB CVUT)

#### 4.5.4 Charakteristika doby srážky

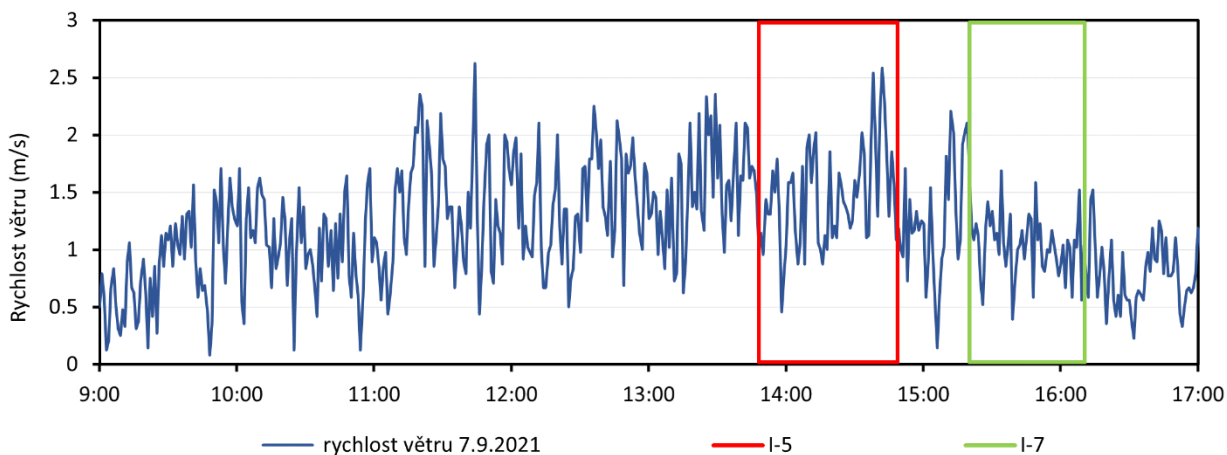
Každá experimentální plocha byla zavlažována jinou dobu v závislosti na době začátku odtoku. Srážka tedy trvala tak dlouho, dokud nebyl substrát nasycen a voda nezačala odtékat, jedná se o přímý dešťový odtok. Průměrná srážková intenzita dosahovala 0,18 mm/min a průměrným úhrnem 9,9 mm za dobu trvání srážky. Postřikovač byl vypnut vždy cca 2 a půl minuty po zaznamenání prvního odtoku z dané plochy. U plochy I-8 (ACRE) byla doba zavlažování pouze 35,5 minuty, naopak u plochy I-2 (Rašelina) 86,3 minut. V závislosti na době odtoku se lišil i objem srážky, který na jednotlivé plochy dopadl. V tab. 4.3 je uveden přehled údajů o jednotlivých měřeních v rámci experimentu.

Tab. 4.3 Přehled údajů o jednotlivých měřeních v rámci experimentu

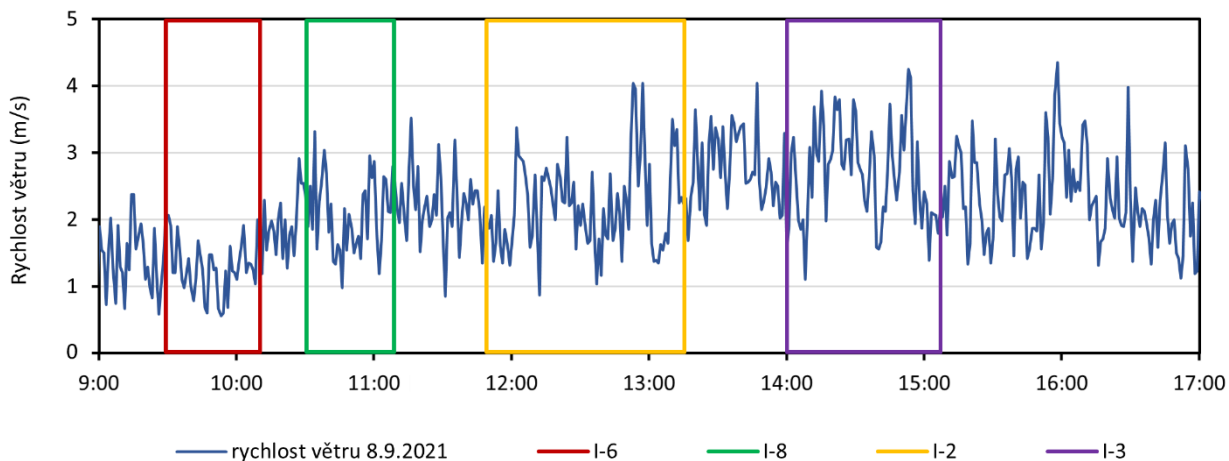
Plocha	Datum měření	Čas začátku srážky	Čas konce srážky	Průměrná rychlost větru (m/s)
I-5	07.09.2021	13:48:00	14:48:46	1.45
I-7	07.09.2021	15:20:00	16:10:30	1.04
I-6	08.09.2021	9:29:00	10:10:00	1.29
I-8	08.09.2021	10:30:30	11:08:30	2.08
I-2	08.09.2021	11:49:00	13:15:20	2.21
I-3	08.09.2021	14:00:00	15:07:00	2.67

#### 4.5.5 Odnos srážky vlivem povětrnostních podmínek

Především kvůli větrnému počasí byla část simulované srážky odnesena větrem na okolní experimentální plochy, chodníčky či kačírkový zásyp v okolí. Ze zápisu z meteorologické stanice byla vybrána data rychlostí větru v době skrápění jednotlivých ploch. Barevným ohraničením jsou v grafech (obr. 4.16, obr. 4.17) zobrazeny doby skrápění jednotlivých ploch od spuštění zahradního postřikovače až po dobu jeho vypnutí. Je zde vidět porovnání obou dnů experimentu, kdy druhý den byla měřena rychlost větru vyšší.



Obr. 4.16 Údaje rychlosti větru dne 7. 9. 2021 s vyznačením doby skrápění ploch I-5 a I-7



Obr. 4.17 Údaje rychlosti větru dne 8. 9. 2021 s vyznačením doby skrápění ploch I-6, I-8, I-2 a I-3

Jelikož experimenty na jednotlivých plochách probíhaly v jednom dni těsně po sobě, byly sousední plochy zakryty plachtou, aby se voda z vedlejšího experimentu nemohla vsáknout do ještě neměřených ploch a tím zvýšit počáteční vlhkost substrátu. Na obr. 4.18 je fotografie z průběhu experimentu při skrápění plochy I-2.



*Obr. 4.18 Průběh experimentu*

#### 4.5.6 Způsob měření odtoku vody ze zkušebních ploch

Odtok vody byl měřen pomocí sběrného žlabu, do kterého teče voda z experimentální plochy. Jednotlivé plochy jsou uloženy pod podélným sklonem 2 %, aby všechna odtékající voda gravitačně odtekla. Na vyústění sběrného žlabu byl měřen odtok pomocí odebírání vody do plastových nádob. Způsob odběru je vidět na obr. 4.19. Nádobky byly postupně při jejich naplnění vyměřovány a váženy. Pokud nějaká voda do odběrné nádoby napršela přímo z postřikovače, ještě před začátkem odtoku, nebyla počítána. Odtok byl zpočátku mírný a postupně se stával intenzivnějším. Po nějaké době voda z plochy vytékala už jen pomalu. Měření odtoku probíhalo až do chvíle, kdy již žádná voda neodtékala. Ze střech skrápěných první den experimentu se provedl poslední odběr odtoku ráno dalšího dne, kdy se odebrala a zvažila všechna voda, která odtekla během noci. Například ale v případě měřené plochy I-8 (ACRE) byl odtok ukončen již po 27 minutách a dále již žádná voda nevytékala, byla to však nejkratší doba odtoku v porovnání s ostatními plochami.



Obr. 4.19 Zachytávání odtoku do plastových nádob

#### 4.5.7 Měření počáteční vlhkosti substrátů

Těsně před zahájením skrápění byly odebrány 2 vzorky substrátu z každé plochy pro zjištění aktuální vlhkosti před začátkem měření. Vzorky 5A a 5B byly odebrány na ploše I.5. Obdobné značení platí i pro ostatní plochy. Odebraná půda byla uložena do uzavíratelných sáčků a na místě zvážena. Vrstvu půdy byla v místě odebrání mírně promíchána, aby byl získán reprezentativní vzorek z hloubky celého souvrství. Následně byly vzorky opětovně zváženy dne 24. 9. 2021 v hydropedologické laboratoři FSv ČVUT v Dejvicích. Hmotnost sáčků se substrátem byla nižší, jelikož i přes zavření sáčku došlo k částečnému samovolnému vyschnutí. Zemina ze sáčků byla přesypána do porcelánových misek, opět zvážena a vložena do sušící pece (obr. 4.20). Vzorky se sušily při teplotě 65 °C po dobu 5 dní. 29. 11. 2021. byly vyschlé vzorky opět zváženy. Po sušení byla získána hmotnost sušiny a vody v každém vzorku, která byla obsažena v půdě ještě před začátkem experimentu. Hmotnostní vlhkost, poměr vody ve vzorku ku hmotnosti sušiny, byla přepočítána na objemovou vlhkost za znalosti objemových hmotností jednotlivých půd v suchém stavu. Údaje o substrátech  $\rho_b$  byly převzaty z Rybová a kol. 2021 a byly měřeny v říjnu 2021. Přepočet na objemovou vlhkost byl proveden dle (Hillel, 1998) dle rovnice [3] a [4]:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad [3]$$

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_b}{\rho_w} \cdot 100\% \quad [4]$$



$w$  ... hmotnostní vlhkost [-]

$m_w$  ... hmotnost vody ve vzorku [g]

$m_s$  ... hmotnost sušiny [g]

$\theta$  ... objemová vlhkost [%]

$\rho_b$  ... objemová hmotnost v suchém stavu [g]

$\rho_w$  ... hustota vody = 1000 [kg/m<sup>3</sup>]



*Obr. 4.20 Vážení a sušení odebraných vzorků*

#### 4.5.8 Nerovnoměrnost skrápění – program Surfer

Úhrny srážky nebyly po celé ploše konstantní. Pokud foukal silnější vítr, srážka spadla mimo plochu, nevsákla se do substrátu a ani nebyla zaznamenána nárůstem vody v jednotlivých kalíškách. Mohlo zde ale dojít k chybám, jelikož jiné množství srážky mohlo dopadnout do kalíšku a jiné do jeho okolí. Jednotlivé úhrny srážek byly zapsány postupně podle očíslovaných kalíšků a mohly být dále interpretovány do mapy úhrnů srážek, která byla zpracována pomocí programu Surfer. Do programu byla zadána síť umístění 33 kalíšků na ploše a úhrn srážky v každém kalíšku. Program mezi jednotlivými body provedl interpolaci a vykreslil plynulé kontury. V programu byla nastavena metoda interpolace tzv. kriging. Jedná se o nejpoužívanější metodu pro dopočet neznámých hodnot mezi zadanými okraji (GISGeography 2022). Každá linie, v tomto zobrazení černá čára, představuje izohyetu, tedy čáru spojující místa se stejnou srážkou. Metoda interpolace představuje určité zjednodušení problematiky. Pro popsání nerovnoměrnosti srážek je ale dostačující.

## 5 Výsledky experimentu

### 5.1 Snížení odtoku vody

Výsledky skrápěcího experimentu ukazují porovnání množství odtoké vody ze zkoumaných ploch. Následující tab. 5.1 shrnuje vypočtený celkový odtok a délku odtoku. Celkový odtok vody značí jednotlivé objemy vody, které za celou dobu pozorování odtékly z dané plochy. Odtokový součinitel pak poměr odtoku ku objemu srážky. Je zde zobrazena doba srážky a spotřeba vody odečtená z průtokoměru v průběhu experimentu. O době zpoždění odtoku mluví doba srážky. Srážka byla vždy ukončena asi 2,5 minuty po zaznamenání prvního odtoku. Dále je zde zobrazena hodnota celkového objemu srážky, která byla získána jako průměrná hodnota z napršené vody do kalíšků rozmístěných na plochu během skrápění. Objem srážky byl přepočítán na mm úhrnu srážky. Hodnota relativní ztráty vody ukazuje poměr objemu srážky ku spotřebě a značí množství vody, které napršelo mimo skrápěnou plochu. Odnos vody mimo skrápěnou plochu se lišil v závislosti na rychlosti a směru větru v době skrápění a délce doby skrápění. Tyto ztráty vody byly vypočteny odečtením hodnot reálného objemu srážky, zjištěného na základě chytání vody do rozmístěných kalíšků, od hodnoty spotřeby vody zjištěné z průtokoměru. Výsledky naměřené pro jednotlivé plochy jsou uvedeny v pořadí jejich skrápění.

Tab. 5.1 Souhrnné výsledky z jednotlivých ploch měřených během experimentu

Plocha	Substrát	Doba srážky (min)	Spotřeba vody (l)	Objem srážky (l)	Úhrn srážky (mm)	Relativní ztráta vody (-)	Celkový odtok (l)	Celkový odtok (mm)	Doba odtoku
I-5	ACRE	60.8	490.0	336.7	10.7	0.69	15.80	0.614	-
I-7	BB Com	50.5	413.0	304.1	9.7	0.74	20.08	0.343	-
I-6	Rašelina	41.0	337.0	232.8	7.4	0.69	0.75	0.003	1:39:00
I-8	ACRE	35.5	294.0	220.5	7.0	0.75	0.49	0.003	0:27:10
I-2	Rašelina	86.3	708.0	448.5	14.2	0.63	16.22	0.523	2:31:10
I-3	BB Com	67.0	556.0	324.4	10.3	0.58	12.72	0.233	0:55:52

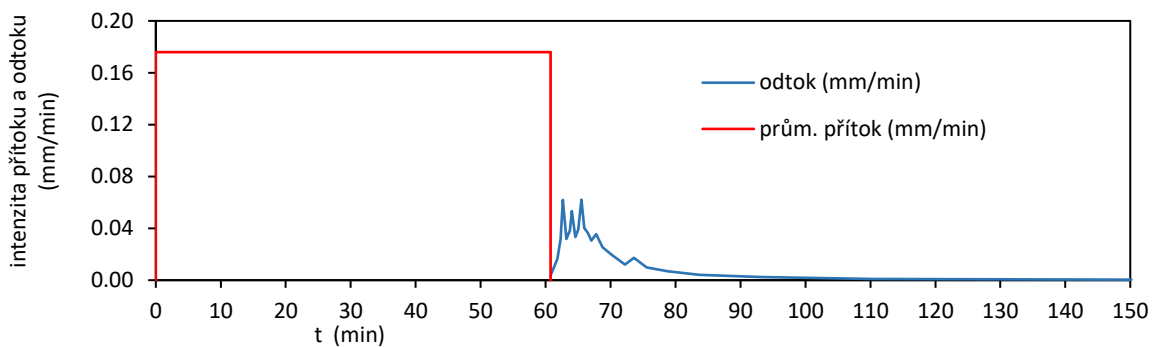
U ploch I-5 a I-7 nelze doba odtoku přesně určit, poslední odběr se realizoval až druhý den ráno, nevíme tedy kdy přesně během noci voda přestala vytékat.

Následující tab. 5.2 shrnuje výsledné odtokové součinitele pro všechny zkoumané plochy. Odtokový součinitel je přepočítán na procentuální hodnotu  $k$ , jež označuje množství vody, které plocha zadržela. Hodnota se vypočítala jako doplněk k odtokovému součiniteli  $C$  a následně byla přepočítána na %. Substráty označené \* označují plochy bez údržby.

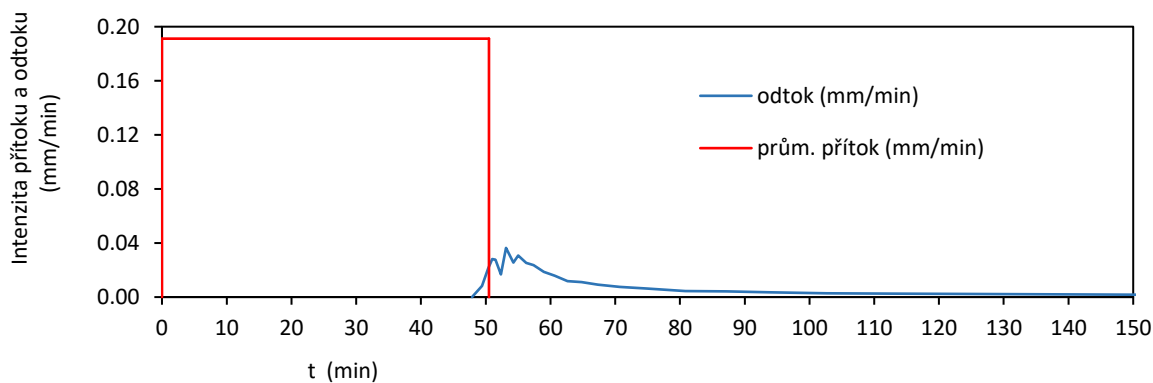
Tab. 5.2 Výsledné odtokové součinitele pro zkoumané plochy

Plocha	Substrát	$C$ (-)	$k$ (%)
I-5	ACRE*	0.047	95.3
I-7	BB Com*	0.066	93.4
I-6	Rašelina*	0.003	99.7
I-8	ACRE	0.002	99.8
I-2	Rašelina	0.036	96.4
I-3	BB Com	0.039	96.1

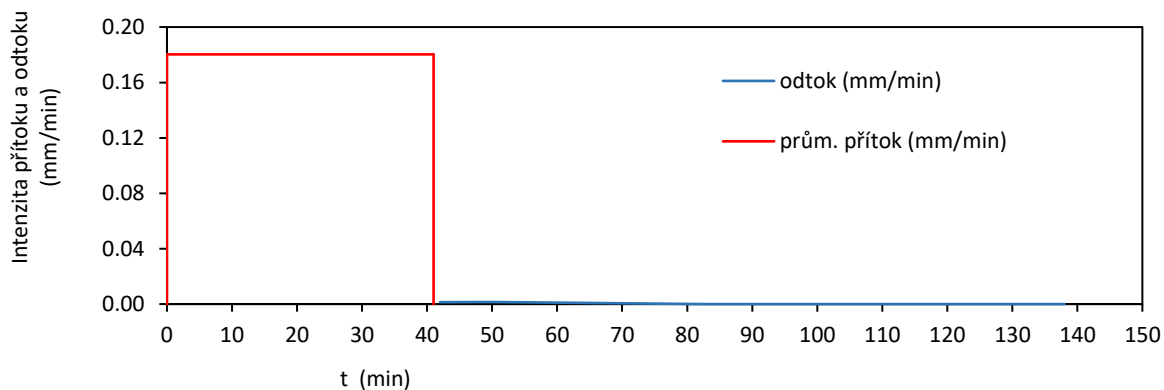
Pro všechny měřené plochy byly vytvořeny grafy (obr. 5.1, obr. 5.2, obr. 5.3, obr. 5.4, obr. 5.5, obr. 5.6) ukazující odtok vody v čase společně s vyjádřením doby skrápění. Doba skrápění se liší v závislosti na době začátku odtoku. Srážka byla ukončena vždy cca 2 a půl m po zaznamenání prvního odtoku. Plochy jsou seřazeny dle pořadí skrápění.



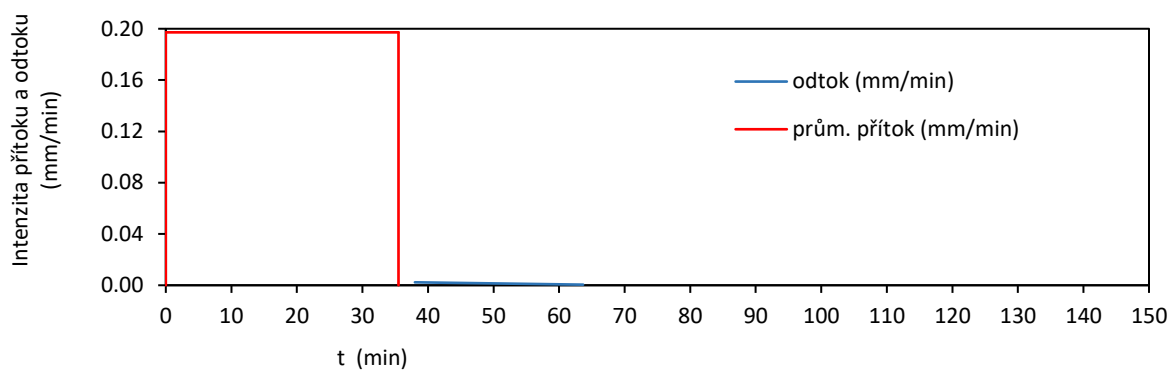
Obr. 5.1 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-5



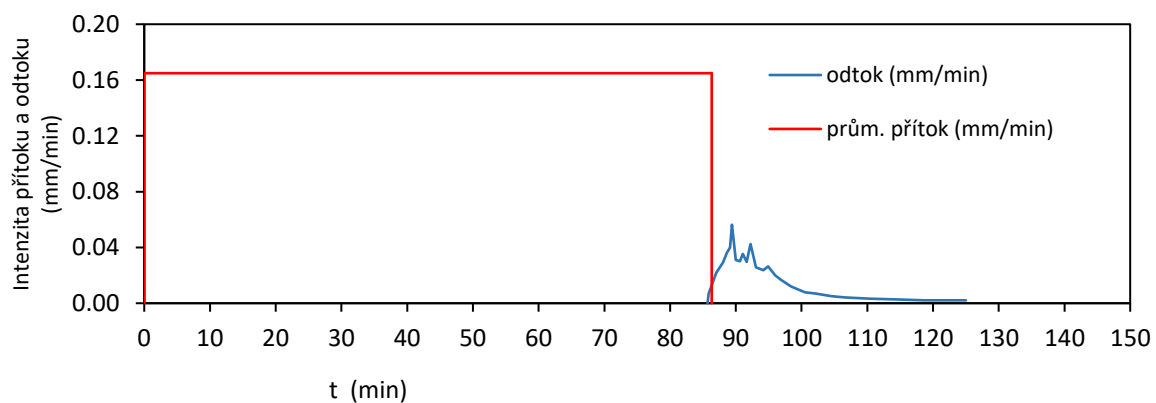
Obr. 5.2 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-7



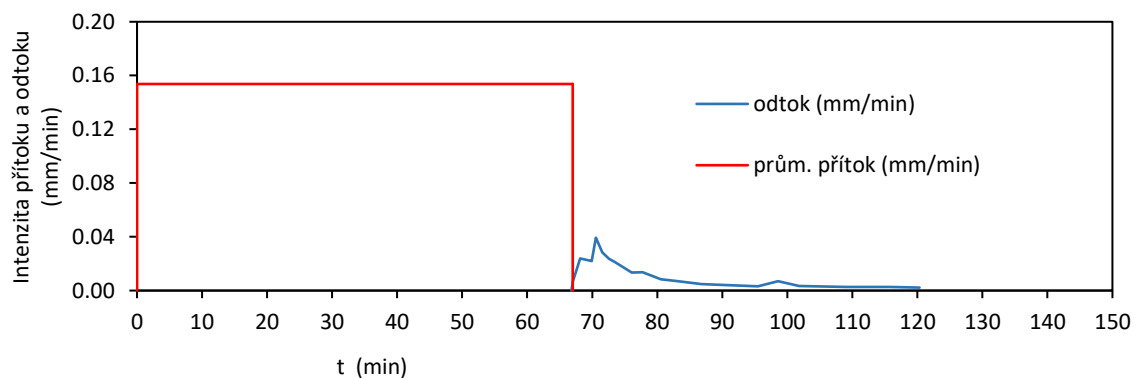
Obr. 5.3 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-6



Obr. 5.4 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-8



Obr. 5.5 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-2



Obr. 5.6 Přítok a odtok vody během skrápěcího experimentu na ploše I-3

## 5.2 Počáteční vlhkosti substrátů

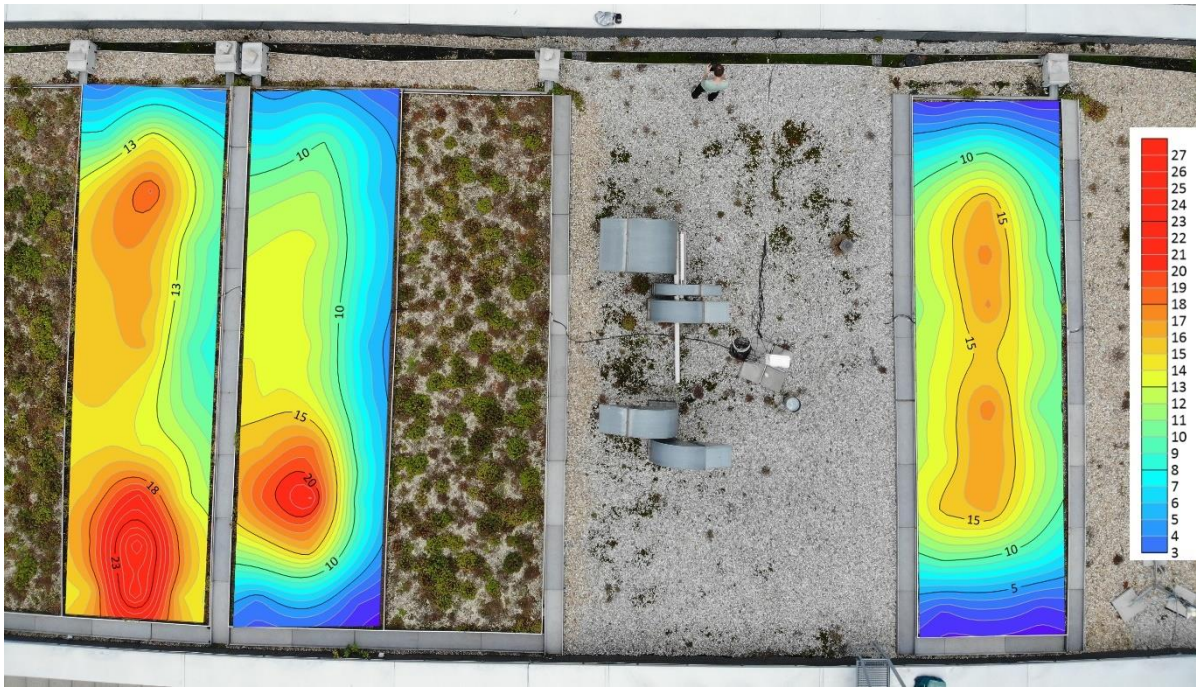
Vlhkosti substrátů byly vyhodnoceny na základě odběru vzorků ze střechy těsně před každým skrápěním. V tab. 5.3 jsou zaznamenány údaje o substrátu potřebné k zjištění počáteční vlhkosti.

Tab. 5.3 Souhrnné výsledky k zjištění vlhkosti půdy před začátkem experimentu

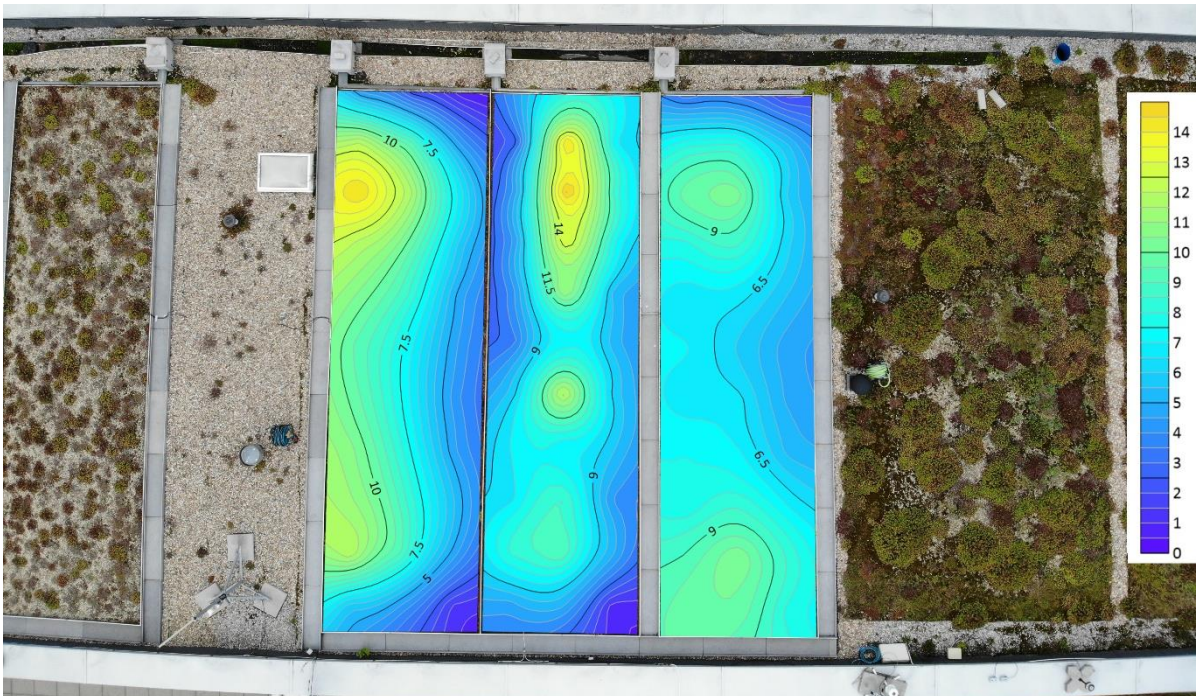
číslo vzorku/střechy	suché vzorky	voda ve vzorku	hmotnostní vlhkost	hmotnostní vlhkost	objemová hmot. v suchém stavu	objemová vlhkost	průměrná objemová vlhkost
	$m_s$ (g)	$m_w$ (g)	w (-)	w (%)	$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\theta$ (%)	$\theta$ (%)
5A	181.64	33.06	0.182	18.2	884.4	16.1	15.0
5B	156.47	24.47	0.156	15.6		13.8	
7A	95.06	17.67	0.186	18.6	450.6	8.4	10.1
7B	85.55	22.43	0.262	26.2		11.8	
6A	105.27	17.32	0.165	16.5	669.2	11.0	12.1
6B	110.25	21.81	0.198	19.8		13.2	
8A	181.03	29.73	0.164	16.4	863.5	14.2	14.7
8B	173.43	30.55	0.176	17.6		15.2	
2A	101.47	15.68	0.155	15.5	685.4	10.6	12.1
2B	118.14	23.36	0.198	19.8		13.6	
3A	72.73	8.75	0.120	12.0	434.8	5.2	6.7
3B	78.14	14.57	0.186	18.6		8.1	

## 5.3 Nerovnoměrnost srážky

Vykreslení úhrnů srážek při skrápění jednotlivých ploch bylo vloženo do leteckého snímku experimentálních střech pro jednoznačnou interpretaci srážkových úhrnů na jednotlivých plochách během obou dnů měření (obr. 5.7, obr. 5.8). Letecký snímek není geometricky vyrovnaný, není zde proto uvedeno měřítko. Jsou zde zobrazeny srážkové úhrny za dobu trvání jednotlivých srážek. U všech ploch je doba srážky jiná, což je třeba vzít v potaz při interpretaci výsledků. Cílem zobrazení je pouze ukázání prostorové nerovnoměrnosti úhrnů na zkušebních plochách.



Obr. 5.7 Úhrny srážek během experimentu na plochách I-2 (vlevo), I-3 (uprostřed) a I-5 (vpravo), uvedeno v mm; autor fotografie: Ing. Petr Wolf, Ph.D.



Obr. 5.8 Úhrny srážek během experimentu na plochách I-6 (vlevo), I-7 (uprostřed) a I-8 (vpravo), uvedeno v mm; autor fotografie: Ing. Petr Wolf, Ph.D.

Vykreslení úhrnů srážek nejvíce odpovídá očekávání u ploch I-5 a I-7. Kontury jsou na úhrny srážky nebyly po celé ploše konstantní. pokud foukal silnější vítr, srážka spadla mimo plochu, nevsákla se do substrátu a ani nebyla zaznamenána nárůstem vody v jednotlivých kalíšcích a obr. 5.8 uzavřené a drží se víceméně na středu ploch. Tyto plochy byly skrápěny první den, kdy bylo nejméně větrné počasí a rychlost větru dosahovala pouze 1,45 a 1,04 m/s. Naopak v případě ploch I-8, I-2 a I-3 nejsou obrazce natolik pravidelné, což odpovídá i vyšší rychlosti větru, až 2,67 m/s. Mírným překvapením je plocha I-6, která byla skrápěna druhý den měření 8. 9. ráno. Vítr byl ještě poměrně mírný, alespoň v porovnání s odpoledním měřením, a srážka zde trvala pouze 41 minut. Přesto je na obr. 5.8 (vlevo) vidět, že obrazec je značně nepravidelný a velká část srážky napršela na sousední kačírkový zásyp. Doba začátku odtoku tedy může být poměrně zkreslena faktem, že u plochy I-6 za většího větru až 30 % vody napršelo na plochy sousední, a proto byla i doba srážky prodloužena.

#### 5.4 Shrnutí a porovnání měřených ploch

Plocha I-5 je vyplněna substrátem ACRE s počáteční objemovou vlhkostí 15 %. Spotřeba vody zaznamenaná na průtokoměru ke skrápění plochy I-5 byla 490 l za dobu 60,8 min, na plochu se ale podle záznamu z kalíšků dostalo pouze 336,7 l. První odtok byl zaznamenán po 58 minutách od začátku skrápění. Celkový odtok změřený ve sběrném žlabu po skrápění plochy byl 15,8 l, odtokový součinitel odpovídá hodnotě 0,047. Poslední odběr odteklé vody byl realizován po 18 a půl hodině od doby prvního odtoku, dále již žádná voda neodtékala. Již po 3 h a 20 min byl ale odtok velmi pomalý a voda odtékala rychlostí 0,000082 l/s (0,48 ml/min). Prostorové uspořádání úhrnů srážek při skrápění plochy I-5 bylo pravidelné a jen málo ovlivněné větrným počasím.

Plocha I-7 (substrát BB Com s počáteční objemovou vlhkostí 10,1 %) byla zavlažována 50,5 min, spotřeba vody byla 413 l, ale na plochu dopadlo asi 304 l. Odtok vody začal po 48 min, celkový odtok představoval 20,08 l vody a odtokový součinitel odpovídá číslu 0,066. Poslední odběr vody byl realizován po 16 h 50 min od doby prvního odtoku, dále již odtok neprobíhal. Po 2 h dosahoval odtok 0,00077 l/s (46,11 ml/min). Prostorové uspořádání úhrnů srážek při skrápění plochy I-5 bylo pravidelné a jen málo ovlivněné větrným počasím.

Plocha I-6 (substrát Rašelina Soběslav s počáteční objemovou vlhkostí 12,1 %) byla zavlažována 41 min množstvím 337 l vody. Na plochu dopadlo 232,8 l. První odtok byl zaznamenán po 38 min od začátku skrápění a celkové množství odtoku bylo pouze 0,75 l, čemuž odpovídá odtokový součinitel 0,003. Odtok vody byl pozorován pouze 1 h 39 min.

Plocha I-8 (substrát ACRE s počáteční objemovou vlhkostí 14,7 %) byla zavlažována 35,5 min množstvím 294 l vody. Na plochu dopadlo 220,5 l. První odtok byl zaznamenán po 33 min od začátku



skrápění a celkové množství odtoku bylo pouze 0,49 l, čemuž odpovídá odtokový součinitel 0,002. Odtok vody byl pozorován pouze 27 min.

Plocha I-2 (substrát Rašelina Soběslav s počáteční objemovou vlhkostí 12,1 %) byl zavlažován 86,3 min množstvím 708 l vody. Na plochu dopadlo 448,5 l. První odtok byl zaznamenán po 83 min od začátku skrápění a celkové množství odtoku bylo 16,22 l, čemuž odpovídá odtokový součinitel 0,036. Odtok vody byl pozorován pouze 2 h 31 min.

Plocha I-3 (substrát BB Com s počáteční objemovou vlhkostí 6,7 %) byla zavlažována 67 min množstvím 556 l vody. Na plochu dopadlo 324,4 l. První odtok byl zaznamenán po 64 min od začátku skrápění a celkové množství odtoku bylo 12,72 l, čemuž odpovídá odtokový součinitel 0,039. Odtok vody byl pozorován pouze 56 min. Prostorové uspořádání úhrnů srážek při skrápění ploch I-6, I-8, I-2 a I-3 bylo poměrně nepravidelné a značně ovlivněné větrným počasím, kdy většina srážky nedopadla na střed plochy. Oblasti nejvyšších úhrnů byly ovlivněny směrem větru.

## 6 Diskuse

### 6.1 Porovnání zkušebních ploch

Nejdelší doba srážky, přes 86 minut, byla zaznamenána na ploše I-2 se substrátem Rašelina. Tento fakt mohl být způsoben akumulací vody na povrchu, jež byla během skrápění pozorována především v místě vysokého úhrnu srážky. Tato místa jsou na obr. 5.7 (vlevo) znázorněna vysokým úhrnem srážky, tedy červenou barvou. Substrát byl nejspíše v nějakých místech již nasycený, k odtoku vody ale ještě nedocházelo. Vysvětlením může být výskyt mechu, který pro zelené střechy není ideální. Dalším vysvětlením může být hydrofobní vlastnost půdy. Rašelina, s vysokým obsahem organické hmoty, může způsobit špatné vsakování vody do půdy (Trávníky 2010). Hydrofobní vlastnosti ale v této práci nebyly dále testovány.

Dle studie Jelínková a kol. (2016) má vliv na chování odtoku i zastoupení jemnozrnných částic. Půda s vysokým zastoupením jemné frakce může být obecně náchylnější k tvorbě půdních trhlin. Půda je náchylnější ke ztuhnutí. Může dojít i k zvýšenému zahlcení půdy nad drenážní vrstvou, a tak dojít k tvorbě lokálních kaluží vody, což pro zelené střechy není vhodné. Jak lze vidět z porovnání zrnitostního složení na obr. 4.5, nejvyšší zastoupení jemnozrnných částic je u substrátu Rašelina Soběslav. Zde byla místní akumulace vody na povrchu pozorována, zastoupení jemnozrnné frakce v substrátu může mít tedy na chování odtoku vliv i při tomto měření.

Odtok vody byl rychlý naopak u ploch I-6 (Rašelina) a I-8 (ACRE). Byl zaznamenán před koncem skrápění, které trvalo pouze 41 min (I-6) resp. 35,5 min (I-8). Oproti jiným plochám vyteklo velmi malé množství vody, pouze 0,75 l resp. 0,49 l. Na plochu přitom napršelo 337 a 294 l vody. Odtokový součinitel zde dosahuje nejnižších hodnot, pouze 0,003 resp. 0,002. Vysvětlením může být zrychlený odtok vody preferenční cestou vytvořenou kořenovým systémem. I u ostatních střech byla ale redukce odtoku účinná a z plochy vytekla vždy asi jen 1/20 objemu srážky. U všech měřených ploch došlo k oddálení doby odtoku, což má v praxi pozitivní vliv na zátěž stokové sítě během srážkové události.

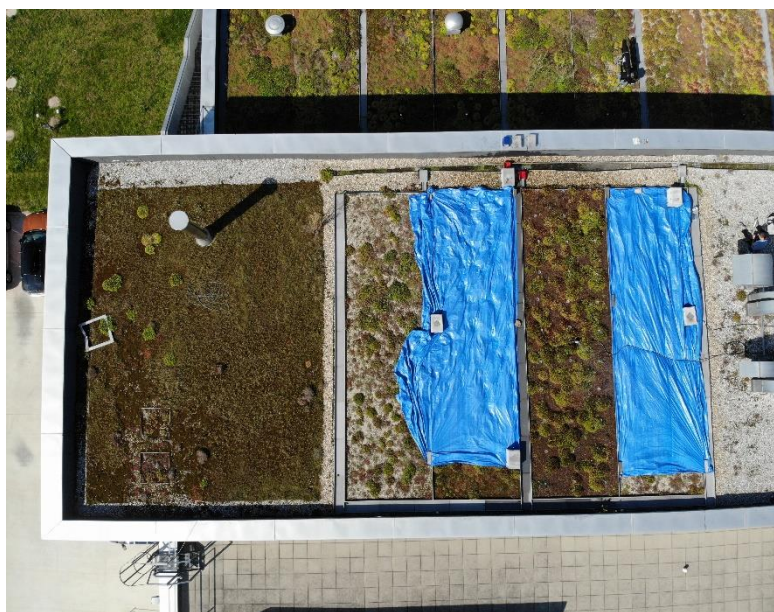
V porovnání všech měřených ploch zadržely nejvíce vody plochy v pořadí I-8, I-6, I-2, I-3, I-5 a I-7. Průměrně v tomto experimentu byla zaznamenána největší retence vody u substrátu Rašelina, až 98 %. U substrátu ACRE bylo zadrženo 97,5 % vody a u substrátu BB Com 94,7 %. U všech substrátů byla retence vody o několik procent nižší u ploch bez údržby.

Objemová vlhkost zde neměla rozhodující vliv. Nejméně vlhká byla plocha I-3, kdy zde objemová vlhkost dosahovala pouze 6,7 %. Nejvíce vlhká byla plocha I-5 s objemovou vlhkostí 15 %. Mezi vlhkostmi všech půd nebyly zaznamenány extrémní rozdíly, tudíž počáteční vlhkosti hlavní roli

v určování účinnosti redukce odtoku nehrály. V tomto rozmezí nebyla prokázána žádná korelace mezi množstvím zadržené vody a počáteční objemovou vlhkostí substrátů. Při vyšších rozdílech vlhkostí mezi substráty může být ale tato hodnota rozhodující. Větší vliv na odtok vody ze souvrství má tedy nejspíše skladba zkušebních ploch. Velký vliv má i jejich pokrývnost vegetací.

## 6.2 Spolehlivost skrápění

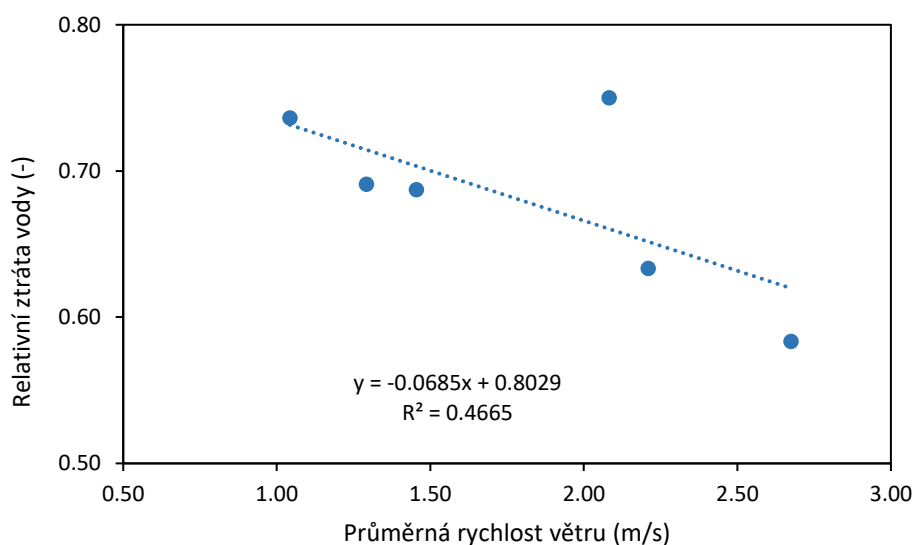
Při skrápění ploch mohlo dojít k chybám v měření. Je třeba zmínit zakrytí okolních ploch plachtou. Na leteckém snímku ze druhého dne experimentu (obr. 6.1) je zavlažována plocha I-3. Ve chvíli, kdy foukal silný vítr, byla voda odnesena na okolní plochy, jež nejsou zakryty po celé ploše a voda může částečně na tyto sousední plochy také natéct. Mohlo zde tedy dojít k infiltraci vody v místě absence plachty, či při následné manipulaci a odstraňování plachet pryč. Tento nedostatek se netýká první měřené plochy I-5. Za větrného stavu nedosahoval postřikovač po celé délce plochy a na druhé straně naopak skrápěl i přilehlý kačírkový zásyp a atiku střechy, což je také znatelné na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Letecký snímek zakrytých okolních ploch během experimentu, autor fotografie: Ing. Petr Wolf, Ph.D.

Pokud do grafu (obr. 6.2) vyneseme závislost relativní ztráty vody (poměr objemu srážky ku spotřebě vody) a průměrné rychlosti větru, které byly změřeny v průběhu skrápění, dostaneme několik bodů, kterými lze proložit funkci pro popsání této závislosti. Předpis ovšem nevykazuje vysokou hodnotu spolehlivosti  $R^2$  a proto je spíše orientační. Pokud bychom z pozorování vynechali závislost získanou z plochy I-8 (rychlost větru v tomto případě dosahuje 2,08 m/s), která se nejvíce oddaluje předpisu lineární funkce, hodnota spolehlivosti by se zvýšila na 0,97. Pokud bychom tuto odchylku odůvodnili

např. špatnou manipulací s plachtou při zavlažování sousední plochy, byla by závislost těchto veličin zjevná.



Obr. 6.2 Závislost relativní ztráty vody na průměrné rychlosti větru

Spolehlivost měření úhrnu srážek pomocí kalíšků také není dokonalé. Je možné, že při dopadu kapek se voda ode dna kalíšku odráží ven a následně se nezapočítává do celkového úhrnu. Tato chyba ovšem nebude v pozorování celkového úhrnu srážek příliš významná a byla zanedbána.

## 7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá odtokem vody ze zkušebních ploch zelených střech různých skladeb a různých stupňů údržby. Provedená studie představuje jednoduchý demonstrační skrápěcí experiment pro získání základní představy o chování jednotlivých skladeb střech při srážkových událostech charakterizovaných průměrnou srážkovou intenzitou 0,18 mm/min a průměrným úhrnem 9,9 mm za dobu trvání srážky. Průměrné úhrny srážek se na jednotlivých plochách pohybovaly v rozmezí od 7 do 14,2 mm za dobu měření. Při zavlažování byla zaznamenána prostorová nerovnoměrnost skrápění. Srážkové úhrny se koncentrovaly v místech středu plochy, popř. v místech od středu posunutých vlivem směru větru. Maximálně byl v jednom kalíšku zaznamenán za celou dobu srážky úhrn 26,9 mm, minimálně 0,6 mm. Minimální hodnota byla pozorována na okraji plochy I-6 na straně u sběrného žlabu.

Změřená data ukazují, že zkoumaná souvrství zelené střechy jsou schopny zpozdit odtok vody a zadržet poměrně velké množství napadlých srážek. Při experimentu plochy zadržely 93,4 až 99,8 % objemu srážky. Výsledky tohoto experimentu by mohly být využity jako vstupní orientační data pro bližší a přesnější měření odtoku na těchto plochách. Použitá jednoduchá metoda se osvědčila, má však některá úskalí. Při dalších experimentech by bylo vhodné zvolit bezvětrný den, aby prostorové uspořádání úhrnů srážek nebylo ovlivněno povětrnostními podmínkami. Pro zjištění komplexnější informace o odtoku ze souvrství by také bylo třeba experiment provést s různými počátečními vlhkostmi substrátů či rozdílnou pokrývností vegetace, jež může být pro funkčnost střechy rozhodující.

## 8 Seznam použitých zdrojů

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, Apr 2010, 36(4), 351-360.

BURIAN, S. a kol. Vegetační souvrství zelených střech: Standardy pro navrhování, provádění a údržbu. Svaz zakládání a údržby zeleně, 2019.

CARSON, T. B. a kol. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters*, 2013, 8.2: 024036.

ČERMÁKOVÁ, B., R. MUŽÍKOVÁ, 2009. Ozeleněné střechy [online]. Grada, s. 1-20 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-80-247-6973-8. Dostupné z: <https://www.grada.cz/ozelenene-strechy-4387/>

ČESKÁ REPUBLIKA. Příloha č. 16 k vyhlášce č. 428/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva zemědělství, kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: Sbírká zákonů České republiky, 2001.

DOSTALOVÁ, J., S. BURIAN, K. CHALOUPKA a kol., 2021. Zelené střechy: souhra architektury s přírodou. Praha: Grada. ISBN 978-80-271-1326-2.

DOSTALOVÁ, J. Základy správného navrhování zelených střech [online]. OPTIGREEN. 20.6.2008 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/strechy/4921-zaklady-spravneho-navrhovani-zelenych-strech>

ELKINK, A., 2022. The gen on green roofs: They deliver substantial environmental gains, so while New Zealand is slow to jump on the green roof bandwagon, there's reason to think this will change. In: Build [online]. BRANZ, 1 June 2017 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.buildmagazine.org.nz/index.php/articles/show/the-gen-on-green-roofs>

GISGeography: Kriging Interpolation [online]. 22. ledna 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>

HANZLÍKOVÁ, J., P. HEČKOVÁ, M. PETREJE A M. SNĚHOTA. Projekt výzkumu a vývoje – výzkum souvrství extenzivních zelených střech: Průběžná zpráva za období 9/2017-6/2018. Srpen 2018. UCEEB, Buštěhrad.

HILLEL, D., [1998]. *Environmental soil physics*. Amsterdam: Academic Press. ISBN 978-012-3485-250.

Intensive green roofs. In: Green-blue urban grids [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.urbangreenbluegrids.com/measures/green-roofs/intensive-green-roofs/>

JELÍNKOVÁ, V., M. DOHNAL A J. ŠÁCHA Thermal and water regime studied in a thin soil layer of green roof systems at early stage of pedogenesis. *Journal of Soils and Sediments*, Nov 2016, 16(11), 2568-2579.

JELÍNKOVÁ, V., M. DOHNAL A T. PICEK A Green Roof Segment for Monitoring the Hydrological and Thermal Behaviour of Anthropogenic Soil Systems. *Soil and Water Research*, 2015, 10(4), 262-270.

MENTENS, J., RAES, D. A HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*, 2006, 77.3: 217-226.

PETÁKOVÁ, H., 2012. Vegetační střechy podle tradiční norské metody [online]. In: [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/strecha/1642-vegetacni-strechy-podle-tradicni-norske-metody>

RESEARCH SOCIETY FOR LANDSCAPE DEVELOPMENT AND LANDSCAPE CONSTRUCTION. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing: Green Roofing Guideline

FLL, Pokyny pro plánování, výstavbu a údržbu zelených střech. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL guidelines). 2008. Bonn. Dostupné také z: [www.fll.de](http://www.fll.de)

ROBINE, J. M., S. L. K. CHEUNG, S. LE ROY, H. VAN OYEN a kol. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes Rendus Biologies, Feb 2008, 331(2), 171-U175.

RYBOVÁ, B., P. HEČKOVÁ, M. SNĚHOTA, W. BELCH, P. WOLF, E. JOHANISOVÁ, J. RYKL A M. PETREJE. Projekt výzkumu a vývoje – výzkum souvrství extenzivních zelených střech: Závěrečná zpráva, období leden-prosinec 2021. 2021. UCEEB, Buštěhrad.

SENJUG, C. Designing vegetated roofs to survive winter: Photo courtesy Alvin Curling/Next Level Stormwater Management. In: Construction Canada [online]. April 16, 2018 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.constructioncanada.net/designing-vegetated-roofs-to-survive-winter/>

SNĚHOTA, M., J. HANZLÍKOVÁ, M. SOBOTKOVÁ A P. MORAVCIK. Water and thermal regime of extensive green roof test beds planted with sedum cuttings and sedum carpets. Journal of Soils and Sediments, May 2021, 21(5), 2089-2101.

SNĚHOTA, M., 2015. METEOROLOGICKÁ MĚŘENÍ V OKOLÍ BUDOVY UCEEB: Energeticky efektivní budovy, symposium Společnosti pro techniku prostředí. Buštěhrad.

STÁTNÍ FOND ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR, 2022. Nová zelená úsporám, Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory programu Nová zelená úsporám v rámci Národního plánu obnovy: RODINNÉ DOMY. Praha. Dostupné také z: [novazelenausporam.cz](http://novazelenausporam.cz)

ŠANCE PRO BUDOVY. Majitelé budov se zelenými střechami ušetří až 20 tisíc korun za srážkovně: Co bychom měli vědět o vodě [online]. 21.6.2021 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/majitele-budov-se-zelenymi-strechami-usetri-az-20-tisic-korun-za-srazkovne/>

TRÁVNÍKY – okrasné, rekreační a sportovní zelení plochy: Hydrofobnost půdy dokáže výrazně ovlivnit efektivnost závlahy trávníku [online]. 2010 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.travnik-realizace.cz/inpage/hydrofobnost-pudy/>

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. [online]. Praha 5 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://mapy.vumop.cz/>

ZELENÉ STŘECHY v České republice: Zpráva o trhu, prosinec 2021. Sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně. Dostupné také z: <https://www.zelenestrechy.info/>