

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**MOKŘADNĚ-EXTENZIVNÍ VEGETAČNÍ STŘECHA SE SUBSTRÁTEM S PŘÍMĚSÍ
RECYKLOVANÝCH MATERIÁLŮ**

COMBINATION OF CONSTRUCTED WETLAND AND EXTENSIVE GREEN ROOF
THAT USES GROWING MEDIA WITH ADDED RECYCLED MATERIALS

Bc. Marek Petreje

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

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

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Petreje Jméno: Marek Osobní číslo: 460366

Zadávající katedra: Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Mokřadně-extenzivní vegetační střecha se substrátem s příměsí recyklovaných materiálů

Název diplomové práce anglicky: Combination of constructed wetland and extensive green roof that uses growing media with added recycled materials

Pokyny pro vypracování:

V souladu s cílem přechodu světového hospodářství na cirkulární (bezodpadovou) ekonomiku jsou do výstavby vegetačních střešů zaváděny recyklované materiály. Pro případnou závlahu zelených střešů se pak využívá recyklovaných odpadních vod.

V diplomové práci proveďte kritickou rešerši na téma použití recyklovaných materiálů ve vegetačním souvrství zelených střešů a na téma využití odpadní vody pro zavlažování zelených střešů. Navrhněte různé varianty inovativní směsi - substrátu pro extenzivní zelené střešy se zastoupením stavebního recyklátu na bázi cihelné drti a pyrolyzovaného čistírenského kalu. Stanovte hydrofyzikální charakteristiky navržených variant substrátů.

Vyberte dvě varianty substrátu, které využijte pro instalaci zkušebního souvrství zelené střešy na malých. Ověření funkce navrženého konceptu zelené střešy proveďte na experimentálních ploškách s mokřadním předčištěním přítékající šedé vody využitě pro závlahu.

Na základě pozorovaného vodního režimu, vodní bilance, kvality vody a rozvoje vegetace zhodnoťte použitelnost konceptu mokřadně-extenzivní střešy se substrátem s příměsí recyklovaných materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Články v odborných časopisech indexovaných v databázi WOS a dalších relevantních odborných časopisech. Hillel D., Environmental Soil Physics, Academic Press, 2006

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

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

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


Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

2.10.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval 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).

Bc. Marek Petreje

V Praze dne

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práci panu doc. Ing Michalu Sněhotovi Ph.D. za odborné a vstřícné vedení práce a za poskytnutí mnoha cenných a užitečných rad a informací.

Rád bych také poděkoval kolegům z výzkumného centra AdMaS v Brně za spolupráci při realizaci experimentu a sběru dat. Zejména pak panu ing. Tomáši Chorazymu Ph.D. a Bc. Michalu Novotnému. Poděkování patří rovněž Barboře Rybové za spolupráci při instalaci experimentu konzultace v oblasti botaniky.

Tato diplomová práce vznikla v rámci dílčího projektu REVOZIM podpořeného prostřednictvím Centra pokročilých materiálů a efektivních budov CAMEB (TN01000056) | Technologickou agenturou České republiky.

Abstrakt

Diplomová práce podrobně analyzuje reálně vytvořený experimentální koncept mokřadně-extenzivní zelené střechy zavlažované předčištěnou šedou vodou. V substrátu extenzivní části je využito recyklované cihelné drti a pyrolyzovaného čistírenského kalu. Za účelem návrhu a následného výběru vhodného substrátu bylo, s přihlédnutím ke zpracované rešerši, připraveno 16 variant substrátů, z nichž dva byly vybrány pro realizaci dvou experimentálních ploch zelených střech. Za účelem posouzení vlivu biouhlu je jedna z ploch osazena substrátem s jeho příměsí a druhá je ponechána bez něho. Cihelná drť je součástí obou použitých substrátů. Koncept mokřadně-extenzivní zelené střechy je analyzován na základě měření vodní bilance, laboratorních analýz vzorků vody odebraných z různých částí experimentální sestavy, měření teploty a vlhkosti po výšce souvrství a hydrofyzikálních charakteristik navržených substrátů jako je maximální vodní kapacita, objemová hmotnost, zrnitost či pH. V práci jsou představeny, v návaznosti na zpracovanou rešerši diskutovány a vyhodnoceny výsledky. V závěru je posouzena funkčnost celého navrženého konceptu. Po půlročním pozorování se koncept mokřadně-extenzivní zelené střechy jeví jako životaschopný s dobře prosperující vegetací a relativně nízkými koncentracemi nutrientů na výtoky.

Klíčová slova

Zelená střecha, umělý mokřad, biouhel, cihelná drť, recyklovaný materiál, šedá voda

Abstract

This diploma thesis analyses in detail experimental concept of a constructed wetland-extensive green roof irrigated with pre-treated grey water. In a growing medium of the extensive green roof the recycled crushed brick and pyrolyzed sewage sludge were used. In order to design and select a suitable growing medium, 16 variants of substrates were prepared on the basis of the literature research. Two substrates were chosen for filling of the extensive roof part of two experimental beds. In order to assess the effect of pyrolyzed sewage sludge, only one experimental bed contained this material, whereas the crushed brick was part of both substrates. The concept of constructed wetland-extensive green roof is assessed on the basis of water balance measurements, laboratory analyses of water samples taken from various parts of the experimental beds, temperature and humidity measurements along the experimental bed's layers height. Hydro-physical characteristics of the designed substrates such as maximum water capacity, bulk density, grain size and pH were determined. The thesis presents and discusses the experimental results. Finally, the functionality of the entire proposed concept is assessed. After first six months of performance, the concept of constructed wetland-extensive green roof seems to be viable. The vegetation is prospering well and there are relatively low concentrations of nutrients in the effluent water.

Key words

Green roof, constructed wetland, biochar, crushed brick, recycled material, grey water

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíl práce	12
3	Rešerše	13
3.1	Motivace k využití biouhle a recyklátu	13
3.2	Legislativní stav v oblasti hospodaření s kaly z ČOV v ČR.....	13
3.3	Biouhel a jeho vliv na vlastnosti půd	13
3.4	Recyklované kamenivo jako složka střešních substrátů.....	14
3.5	Recyklované materiály a biouhel v souvrství zelených střech	15
3.5.1	Terminologie v oblasti zadržování vody substrátem	16
3.5.2	Vliv cihelné drti na vodní režim substrátů.....	17
3.5.3	Vliv biouhlí na vodní režim	18
3.5.4	Vliv cihelné drti na chemizmus substrátů	18
3.5.5	Vliv biouhlí na chemizmus substrátů.....	19
3.5.6	Shrnutí vlivu recyklovaných materiálů v substrátech zelených střech.....	24
3.6	Šedá voda	25
3.6.1	Co je šedá voda.....	25
3.6.2	Proč šedou vodu recyklovat	25
3.6.3	Množství a kvalita šedé vody.....	25
3.6.4	Zdravotní rizika spojená s využíváním šedé vody.....	26
3.6.5	Čištění šedé vody.....	26
3.6.6	Vliv šedé vody na půdu.....	28
3.6.7	Legislativa pro nakládání s šedými vodami	28
3.6.8	Příklad hospodaření s šedou vodou	29
4	Návrh a testování substrátů s podílem recyklovaných materiálů.....	30
4.1	Návrh a příprava substrátů.....	30
4.2	Laboratorní analýzy substrátů.....	32
4.2.1	Objemové hmotnosti složek substrátů	32
4.2.2	Maximální vodní kapacita a objemové hmotnosti substrátů.....	33
4.2.3	Zrnitost	35
4.2.4	Kyselost substrátů a konduktivita výluhu.....	35
4.2.5	Retenční čáry	36
4.3	Porovnání navrženého substrátu s nabídkou vybraných střešních substrátů na trhu.....	40
5	Experimentální testování mokřadně-extenzivní zelené střechy	41

5.1	Instalace experimentální sestavy	41
5.1.1	Přípravné práce provedené na UCEEB-ČVUT	41
5.1.2	Instalace v areálu AdMaS	42
5.2	Popis experimentální sestavy	44
5.2.1	Mokřadně-extenzivní zelená střecha	44
5.2.2	Měření nátoky a odtoku	45
5.2.3	Vlhkostní a teplotní čidla	47
5.3	Výpočet evapotranspirace	49
5.4	Optimalizace chodu experimentu	52
5.5	Výsledky měření na experimentálních plochách	52
5.5.1	Měření vodní bilance	53
5.5.2	Reakce odtoku na závlahu	54
5.5.3	Konduktivita odtoku	55
5.5.4	Měření a přepočítání vlhkosti	56
5.5.5	Měření teploty	59
5.5.6	Vývoj vegetace na experimentálních plochách	60
6	Kampaň s monitoringem chemismu vody	63
6.1	Metodika vzorkování	63
6.2	Výsledky chemických rozborů	64
7	Experimentální střecha v Třešti	67
8	Diskuze výsledků	71
8.1	Maximální vodní kapacita a objemová hmotnost substrátů	71
8.2	Vodní bilance na experimentálních plochách a evapotranspirace	71
8.3	Evapotranspirace	72
8.4	Vlhkost	72
8.5	Teplota	72
8.6	Stav vegetace	73
8.7	Chemismus substrátů – pH	73
8.8	Chemismus vzorkovací kampaně	73
8.8.1	Chemismus – nutrienty	73
8.8.2	Chemismus – CHSK-Cr, BSK5	76
9	Doporučení pro pokračování experimentů	77
10	Závěr	78
11	Seznam tabulek	79

12	Seznam obrázků	80
13	Seznam literatury	83
14	Přílohy.....	89
	Příloha 1: Protokol o zkoušce čistírenského kalu	90
	Příloha 2: Teploty měřené na experimentálních plochách	91

1 Úvod

Zelené střechy (ZS), často také nazývané jako vegetační, poskytují mnoho výhod jak samotným budovám, tak i jejich okolí. Přínosy pro budovu, na které se nacházejí, spočívají hlavně ve zlepšení jejího tepelného režimu [1], [2]. V zimních obdobích mají ZS schopnost snižovat tepelné ztráty a v letních měsících naopak fungují jako energeticky nenáročné chlazení budovy, čímž snižují výslednou energetickou náročnost. To jde ruku v ruce s finančními úsporami. Často také poskytují prostor k pobytu a relaxaci a chrání hydroizolaci střechy před přímým účinkem slunečního UV záření, čímž prodlužují její životnost [2]. Ve svém okolí vylepšují kvalitu ovzduší tím, že váží prachové částice a snižují tak prašnost. Jako všechna živá vegetace rovněž pohlcují oxid uhličitý a produkují kyslík [2]. Rovněž zadržují množství srážkové vody, čímž snižují špičkové náporů na dešťovou kanalizaci, nebo na stále často používanou jednotnou kanalizaci. ZS jsou účinným nástrojem při redukci efektu městského tepelného ostrova a dále tak zpříjemňují život zejména ve velkých urbanizovaných celcích a to především ve večerních a nočních hodinách. Jsou efektivním nástrojem pro udržení biodiverzity tím, že poskytují prostor pro život mnoha druhů organismů - zejména pro hmyz a ptactvo [3]. Kladou však zvýšené nároky na nosnou konstrukci budov, což je prodražuje. Omezená je rovněž možnost oprav hydroizolace v případě poruchy.

Dalším velkým tématem posledních let je využití šedé vody pro závlahu zelené infrastruktury měst, do které spadají zelené střechy či zelené stěny [4] [5]. Šedou vodu je před použitím vhodné upravit. Při čištění šedé vody se osvědčily umělé mokřady, avšak jejich využití v hustě urbanizovaných oblastech zůstává výzvou [4].

Zelené střechy se v posledních letech stávají stále populárnějším řešením a to i v souvislosti s bonusem, který za ně budova může získat v souvislosti s ekologickou certifikací. Každá konstrukce však vyžaduje nějaký materiální vstup. To platí i pro zelené střechy. S ohledem na se ztenčování primárních zdrojů nerostného bohatství, stále narůstá tlak na opětovné využívání surovin a jejich recyklaci [6]. V souvislosti s tím je často zmiňována cirkulární (oběhová) ekonomika jako možné řešení tohoto problému [7]. Tento koncept bude pravděpodobně podstatnou součástí nové strategie EU v oblasti životního prostředí a reakce na změnu klimatu známý jako „Green Deal“ [8]. Nalezení způsobu využití odpadních materiálů v souvrství zelených střech tento koncept podporuje.

Tato diplomová práce vznikla v návaznosti na projekt CAMEB REVOZIM cílící na výzkum využití šedých vod, materiálové recyklace a modrozelené infrastruktury měst a v tématu zelených střech navazuje na bakalářskou práci z roku 2019 zabývající se teplotním režimem zelených střech [9].

2 Cíl práce

Cílem práce bylo v první řadě vypracovat odbornou rešerši literatury na téma využití biouhlu a cihelné drti v substrátech zelených střech a na téma čištění šedé vody pro použití na jejich závlahy. Cílem bylo popsat současný stav poznání v oblasti a zejména zmapovat vliv biouhlu a (recyklované) cihelné drti na kvalitu a objem odtoku ze zelených střech. Přednostně byly vybírány zdroje popisující experimenty se současným použitím biouhlu a cihelné drti na experimentálních plochách zelených střech.

Cílem praktické části bylo navržení více variant inovativního substrátu se zastoupením stavebního recyklátu na bázi cihelné drti a pyrolyzovaného čistírenského kalu, stanovení hydrofyzikálních charakteristik navržených substrátů a výběr některých z nich pro použití při instalaci na malých zkušebních plochách se souvrstvím zelených střech s mokřadním předčištěním šedé vody určené pro jejich závlahu. Dále bylo cílem ověřit funkčnost a použitelnost tohoto konceptu na základě monitoringu vodní bilance, pozorování vodního režimu a chemického rozboru vody.

3 Rešerše

Účelem této kapitoly je popsat stav poznání v oblasti využití biouhlu pro zlepšování vlastností půd, resp. substrátů pro zelené střechy a vliv biouhlu a recyklované cihelné drti na vodní režim a chemismus půd, střešních substrátů a odtoku z nich. Ve druhé části se pak kapitola věnuje možnostem čištění šedých vod, jejich využití zejména ve vztahu k zavlažování zelených střech a nastiňuje legislativní stav problematiky.

3.1 Motivace k využití biouhle a recyklátu

Využití stavebního recyklátu s podílem cihelné drti je podobně jako u biouhle původem z čistírenského kalu v zájmu implementace principů cirkulární ekonomiky. Zatímco ve formě biouhli je organická hmota navracována zpět do oběhu, recyklovaná cihelná drť nahrazuje těžbu tradičních anorganických primárních materiálů substrátů zelených střech, jakými jsou pemza, zeolit, scoria (tj. přírodní vulkanická struska –[10]) či vermikulit [11].

3.2 Legislativní stav v oblasti hospodaření s kaly z ČOV v ČR

S čistírenským kalem se nakládá v režimu zákona 541/2020 Sb. o odpadech, který k 1.1.2020 nahrazuje zákon 185/2001 Sb. o odpadech a vyhlášku 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.

Zákon řeší zejména použití kalů na zemědělské půdě a říká, že upravený kal musí být označen s uvedením způsobu úpravy kalu. Úprava kalu smí probíhat jen v čistíreně odpadních vod, kde kal vznikl nebo v zařízení na úpravu kalu. Před první aplikací na zemědělskou půdu musí být osobou provádějící úpravu kalu vypracován program použití kalů, jež musí být předložen ke schválení Ústřednímu kontrolnímu a zkušebnímu ústavu zemědělskému. *„Kal určený pro používání na zemědělské půdě smí mísit pouze osoba, která provádí úpravu kalů, a to pouze s jiným kalem nebo s látkami vymezenými vyhláškou ministerstva, pokud je to vhodné s ohledem na nutriční potřeby rostlin nebo s ohledem na zlepšování kvality půdy.“* *„Vzniklá směs musí před aplikací na zemědělskou půdu splňovat mikrobiální kritéria a mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek předepsané vyhláškou ministerstva.“* Na zemědělské půdě smí být použity pouze upravené kaly s ohledem na nutriční potřeby rostlin a v souladu se schváleným programem použití kalů tak, aby použitím kalů nebyla zhoršena kvalita zemědělské půdy a kvalita povrchových a podzemních vod. Rovněž zemědělská půda, na kterou je kal aplikován musí splňovat mezní hodnoty rizikových látek, těžkých kovů a mikrobiální kritéria. Zákon přímo zakazuje použití kalů na řadě ploch, například v chráněných územích.

Pro uvedení substrátu do oběhu je nutná jeho registrace podle zákona 156/1998 Sb. o hnojivech jako pomocné látky. Přihlašovaná pomocná látka může být podrobena testům na náklady žadatele o registraci.

3.3 Biouhel a jeho vliv na vlastnosti půd

Biouhel, nebo také biouhli, anglicky biochar, je materiál vzniklý tepelnou přeměnou organické hmoty, jako jsou například hnůj, dřevo, listí či digestát z ČOV, za omezeného přístupu kyslíku [12][13][14]. V závislosti na teplotě, množství vzduchu, tlaku, době pyrolyzního procesu a vstupní surovině jsou pak charakteristiky vzniklého biouhle odlišné. [15][13][16]. Biouhel může být produkován velmi jednoduchým způsobem v jámě vyhloubené v zemi, nebo též velmi sofistikovaně v průmyslově kontrolovaném prostředí [15]. V závislosti na dosažené teplotě a době zahřívání dělíme proces na rychlou a pomalou pyrolýzu. Při pomalé pyrolýze, kde teplota vzrůstá postupně až na 800 °C, vzniká více biouhlu (35 % hm.) a méně pyrolyzního oleje a plynu. Naopak při rychlé pyrolýze, kde teplota na

několik sekund dosahuje až 1200 °C, vzniká na úkor biouhlu (15–25 % hm.) oleje a plynu více. Bylo také dokázáno, že se vzrůstající teplotou pyrolýzy je dosahováno většího povrchu biouhlu a nižšího celkového výtěžku [13]. Reaktivní povrch může dosahovat až stovek m²/g [17]. Se vzrůstající teplotou pyrolýzy klesá v biouhlu obsah nutrientů a minerálního obsahu a z hlediska produkčního biouhlu je tak vhodnější nižší teplota procesu. Současně s větším podílem uhlíku ve vstupní surovině klesá stabilita biouhlu [15].

Díky svým vlastnostem a stabilní organické formě, která mimo jiné sekvestruje uhlík a zamezuje tak jeho zpětnému uvolňování do atmosféry, může být biouhel atraktivním materiálem v oblastech zemědělství, lesnictví, ale i v urbánních oblastech při realizaci zelených střech a fasád, kde zvyšuje schopnost zadržet vodu v půdě či substrátu, zlehčuje půdu, zvyšuje pH, zvyšuje mikrobiální aktivitu v místech aplikace a zvyšuje využití prvků původem z hnojiv tak, že je zadržívá a postupně uvolňuje, čímž rovněž snižuje jejich únik do podzemních vod, [17] [18] [19]. Fosfor je obvykle limitujícím nutrientem pro rozvoj eutrofizace [20]. Snížením jeho vymývání ze zelených střech aplikací biouhlí můžeme snížit jeho obsah ve vodách [19], tím teoreticky snížit výskyt eutrofizace, nadměrného růstu biomasy, jejího následného odumírání a kyslíkových havárií.

V naší moderní společnosti se možnosti jeho použití, zejména na zlepšení vlastností půd, začaly diskutovat teprve nedávno, ale patrně byly známy daleko dříve. Důkazem toho mohou být úrodné amazonské, uměle vytvořené, černé půdy s přítomností biouhlu nazývané jako Terra préta de Indio s odhadovaným stářím přes 1000 let. Možnosti využití biouhlí byly znovuobjeveny v polovině 20. století a v Japonsku se takto využívají již přes 30 let [21]. Cox a kol. [15] v publikaci o využití biouhle v australském zemědělství se uvádí, že v experimentech bylo na plochy aplikováno od 0,2 do 116 t/ha biouhle v závislosti na pěstované plodině. Ve stejné publikaci se píše, že aplikace biouhle vedla v 58 % případů k dosažení vyšších výnosů a ve 37 % nebyla pozorována žádná změna [15]. Do oblasti střední a východní Evropy se používání biouhlí v zemědělství teprve dostává. Jeho využitelností se mimo jiné zabývá program „V4 Biochar Platform“ zaštitovaný Českou zemědělskou univerzitou, který si klade za cíl propojit odborníky v oblasti využití biouhlu a jejich výzkum za účelem urychlení zavedení technologií spojených s biouhlím [17].

3.4 Recyklované kamenivo jako složka střešních substrátů

Burian a kol. [22] uvádí, že použití stavebního recyklátu ani drceného betonu do substrátů zelených střech není vhodné. Drcený beton má špatnou schopnost zadržovat vodu a stavební recyklát zase nestandardní vlastnosti. Naopak drcené cihly a střešní tašky jsou uváděny jako možné řešení pro schopnost zadržovat vodu (nasákavost zrna 27-39 % obj.) a jejich stabilitu. Cihelné ani další recykláty s podílem malty však nejsou doporučeny a to kvůli možnosti vyplavování vápenatých složek a tvorbě krust [22]. Na druhou stranu, škody způsobené uhličitánovým výkvětem nebyly zapříčiněny podílem vápna v souvrství zelené střechy, nýbrž rozpouštěním cementových a betonových potěrů a následným usazováním uhličitánových výkvětů [23].

3.5 Recyklované materiály a biouhel v souvrství zelených střech

V tabulce číslo 1 je uveden přehled relevantních studií zabývajících se použitím biouhle a cihelného recyklátu v substrátech zelených střech včetně objemového zastoupení obou složek a doplňujících charakteristik. Detailněji jsou studie popsány dále.

Tabulka 1: Přehled vybraných studií použití cihelné drti a biouhlí pro substrát zelené střechy

Typ experimentu	Cihelné drti %	Biouhel %	Charakteristika	Poznámka, výstup	Autor
<i>Relevantní literatura zabývající se biouhlem</i>					
Experiment na zk. plochách ZS	0	7	Zvýšení retence o 4,4 %	Snížení vyplavovaných nutrientů (N, P, C) a kalnosti	[18]
Lab. experiment a + skleník	0	0 až 40	s 20 % org. hmoty WHC 51,9 až 79,1 %, bez org. hmoty WHC 30,8 až 53,6 %. WHC biouhlu 265,9 % ⁴	Biouhle zvyšuje WHC	[24]
Vnitřní experiment s dešťovým simulátorem	0	10,5	Zadržení 72 % ze simulovaných srážek u substrátu s i bez biouhlu	Snížení vyplavovaného dusíku, nikoli fosforu	[25]
Experiment na zk. plochách ZS	85/32/19.6 ¹	10 mm, 15.4 % ²	WHC cihelné drti 60 % WHC biouhlu 230 % ⁴	Vložena 10 mm vrstva biouhlu snižující objem vyplavovaného N a P. Neznámá metodika stanovení WHC	[19]
<i>Relevantní literatura zabývající se recyklátem na bázi cihelné drti</i>					
Experiment v kontrolovaném prostředí skleníku	80	0	26,6 % WHC pro frakci cihelné drti 2-4 mm	Malé částice 2-4 mm lépe zadržují vodu	[26]
Experimentální nádoby ve skleníku a lab. testy	80		WHC substrátu s drcenými taškami 10,7 %, WHC substrátu s cihelnou drtí 23.61 %	S rostoucím podílem částic <1 mm roste WHC	[27]
Experiment na zk. plochách ZS	80	0	WHC 24,1 resp. 24,7 %	Drť cihly frakce 5-14, resp. 2-5 mm bez významné změny ve WHC	[28]
Lab. experiment a zk. plochy ZS	35	0	Hydraulická vodivost substrátu 9 mm/min, vodní kapacita ³ 24,6 %	Drcený vápenec (20 %) jako médium omezující emise P.	[29]
Válcový experiment a zk. plocha ZS	20	0	WHC 49,5 %	Cihelná drť + perlit, vermiculit, písek, kokosového textilního vlákna a vegetace => dobrá WHC	[30]

¹ 85 % v substrátu, 32.7 % ve skladbě s kobercem bez biouhlu, 19.6 % ve skladbě s kobercem a biouhlem

² 10 mm (15.4 % ve skladbě 65 mm)

³ pravděpodobně bude myšleno WHC

⁴ pravděpodobně udáváno hmotnostně, což zapříčiňuje výrazně vyšší hodnoty

3.5.1 Terminologie v oblasti zadržování vody substrátem

Velká část anglicky psané literatury pracuje při vyjadřování schopnosti zemin a substrátů zadržovat vodu s termínem „Water holding capacity“ (WHC), (dle <https://www.sfzp.cz/ekoslovník> lze přeložit jako Vodní jímavost). Z důvodu zachování přehlednosti bude v textu dále používána zkratka WHC. Metodika stanovení WHC evidentně není celosvětově zcela sjednocena a v jednotlivých přístupech při stanovování WHC jsou nacházeny větší či menší rozdíly. Sharratta [31] tuto charakteristiku popisuje jako rozdíl mezi nasycením půdy při polní vodní kapacitě (-0,3 Bar ~ -300 cm v.s.) a bodem vadnutí (-15 Bar). Popisuje tak množství vody využitelné rostlinami. Tento přístup potvrzuje Anoop Kumar Srivastava v diskuzi na webu [32] při objasňování termínu WHC. Při měření stavu vodního nasycení při těchto sacích tlakových výškách se nejčastěji používají tzv. přetlakové aparáty s porézní keramickou deskou o definované vstupní hodnotě vzduchu. Okrajově se, dle amerického webu agvise.com, při stanovování WHC, a to zejména v Evropě, využívá i tzv. nulová metoda bez využití přetlakových aparátů. WHC je spočtena z hmotnosti vzorku saturovaného zespodu pomocí spojených nádob (tlak 0 BAR), kde voda v nádobě, ze které je vzorek saturován, sahá do poloviny výšky vzorku saturovaného, a hmotnosti suchého vzorku [33].

WHC je v obou případech pravděpodobně počítána obdobným vzorcem jako je uvedený v rovnici [1], přičemž způsob stanovení hmotností $m_{vlhčí}$ a $m_{sušší}$ se dle konkrétní metody odlišuje a současně není ve všech publikacích, které s tímto termínem pracují, jasné, zda je ve vzorci ve jmenovateli objem vzorku či hmotnost suchého vzorku, respektive, zda je WHC počítána objemově či hmotnostně. Obdobný vzorec je používán i v ČR při stanovení maximální vodní kapacity v metodice uvedené ve Standardech pro navrhování, provoz a údržbu ZS [22] a v německých FFL standardech [23]. Oba vzorce udávají výsledek v %.

$$WHC = \frac{(m_{vlhčí} - m_{sušší}) \cdot 100}{V} \quad [1]$$

Nápadně vysoké hodnoty WHC v člancích [24] a [19] jsou pravděpodobně stanovovány pomocí hmotnostního výpočtu, nebo došlo k výraznému bobtnání materiálu. V člancích není metodika stanovení popsána, což bohužel není výjimkou. Typické hodnoty WHC pro některé materiály lze najít v *tabulce 1*.

Některé zdroje popisují postup stanovení WHC pomocí experimentu se známou hmotností zeminy umístěné na filtrační papír do trychtýře umístěného dále do odměrného válce. Následně se na takto připravený vzorek nalije známý objem vody a po daném čase se změří objem či hmotnost odkapané vody. Z toho se odvodí hmotnost zadržené vody ve vzorku. WHC je pak někdy vypočtena jako voda na vzorek nalitá mínus voda odkapaná z toho odvozené procento [34], [35]. Jinde je WHC měřena tak, že se suchý vzorek nechá sytit zespodu a WHC je vypočtena jako podíl hmotnosti zadržené vody (tedy jako nasycený vzorek mínus suchý vzorek) ku hmotnosti nasyceného vzorku [36].

Studie Vijayaraghavana a Joshi [30] se při měření WHC odkazuje na australské standardy AS 3743-2003: Australian Standards for potting mixes (2003). Graceson a kol. [28] při stanovování WHC použili gravitační metodu drénování dle standardu BSI 1999, kde kapacita zadržování vody byla definována zastoupením pórů zadržujících vodu po odtoku při 4,98 kPa. Vzhledem k tomu, že je v článku uveden objem vzorku, pravděpodobně se vzorec výpočtu podobal tomu používanému při stanovení maximální vodní kapacity (MVK) dle rovnice [2]. Metodika však opět není uvedena. Young a kol. [26] popisuje svou metodu stanovení WHC následovně: Hmotnost suchého vzorku byla stanovena po 3 týdnech sušení na vzduchu ve skleníku. Vzorek byl následně saturován ve stojící vodě pod dobu 2 dnů. Polní vodní kapacita (field capacity dle www.sfzp.cz/ekoslovník) pak byla stanovena po 15 minutách drénování. WHC byla vypočtena jako rozdíl změřených hodnot [26]. Zda byl rozdíl dělen objemem nebo

hmotnostní suchého vzorku, případě úplně jinou hodnotou, není v článku uvedeno. Karczmarczyk a kol. [29] zase používá zkratku WHC pro „Max water holding capacity“ a termín „water capacity“ definuje jen dle polsky psané literatury. O termínu „Maximum water holding capacity“ (dle www.sfzp.cz/ekoslovník přeloženo jako Plná vodní jímavost) hovoří příspěvek na webu Agvise laboratories [33] jako o „evropské metodě“ nevyužívající externího tlaku (přetlakových aparátů). Na rozdíl od pevně stanovených dvou hodin drénování ve standardu od Buriana a kol. [22] používané pro stanovení maximální vodní kapacity (MVK) substrátů v této práci (dále viz kapitola 4.2.2), je zde [33] hovořeno o gravitačním drénování do chvíle dosažení rovnováhy (pozn. nejspíš myšleno do doby, než voda přestane z nádoby okapávat – celková rovnováha vzhledem k pokračujícímu výparu v této fázi nenastane). Termín „Maximální vodní kapacita“ je dle stejného slovníku (www.sfzp.cz/ekoslovník) překládán jako „Maximum moisture capacity“, což je termín, který se v literatuře použité v této práci příliš nevyskytuje.

3.5.2 Vliv cihelné drti na vodní režim substrátů

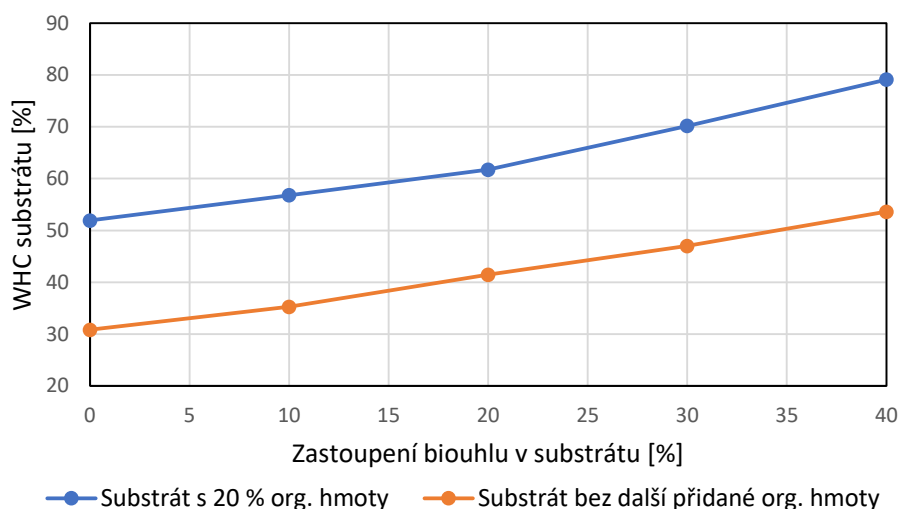
Ve studii [26] bylo testováno použití větší (4-15 mm) a menší (2-5 mm) frakce cihelné drti. Substrát se skládal z 20 % organické hmoty a 80 % cihelné drti. Použití malých částic se ukázalo jako cenově výhodný způsob zvýšení schopnosti zadržet vodu, tzn. zvýšit WHC v substrátu, neboť větší frakce cihelné drti měla tuto kapacitu o 35 % nižší než menší frakce. Substrát s frakcí cihly 4-15 mm zadržel 174 ml vody na 1 l substrátu, kdežto stejný objem substrátu s cihelnou drtí frakce 2-5 mm byl schopen zadržet 266,2 ml/l, což odpovídá 26,6 % WHC. Rovněž celková evapotranspirace byla u substrátu s menší frakcí drti vyšší o 12 %. Podobnou frakci (2–4 mm) minerálních materiálů v substrátech zelených střech doporučuje ve své rešerši i Cascone [11] a zmiňuje i možnost použití cihelné drti, přímo na souvislost s vodním režimem však nepoukazuje. Okolo 80 % cihelné drti použil i Gracesona a kol. ve studii [28], kde na experimentálních ploškách zelených střech 1×1 m² testoval schopnost cihelné drti dvou frakcí a drcených dlaždic, rovněž dvou frakcí, zadržet vodu. Hrubá frakce cihly odpovídala 5-14 mm, jemná pak 2-5 mm. Frakce dlaždic odpovídala 6-15 mm, resp. 0-6 mm. Jako srovnávací vzorek byl použit Lytag® (expandovaný jííl velmi podobný keramzitu). Zbýlých 10-30 % substrátu bylo tvořeno zeleným kompostem dvou různých frakcí. Znatelně zhoršenou WHC na úrovni 10 %, resp. 12 % pro 10 %, resp. 20 % zastoupení zeleného kompostu měl substrát s hrubou drtí původem z dlaždic. Naopak při použití jemné drti z keramických dlaždic byly výsledky WHC ve srovnání s ostatními vzorky nadprůměrné (okolo 30 %). To může být dáno do souvislosti s tím, že jemná drť z dlaždic měla velké zastoupení (40,7 %) částic pod 1 mm. Jemná cihelná drť měla největší zastoupení v intervalu 2-4 mm (68,5 %) a velikost nejzastoupenějších částic tak byla větší u cihelné drti. Vzorky s cihelnou drtí nevykazují v závislosti na velikosti frakce zásadní rozdíly v WHC. Pro substráty s hrubou, resp. jemnou cihelnou drtí se shodným obsahem 20 % zeleného kompostu lišící se jen ve vegetačním pokryvu, mocnosti substrátu a velikostí frakce kompostu (k malé frakci cihly přidána malá frakce kompostu a k velké frakci cihly větší frakce kompostu) byla WHC prakticky identická (24,7 %, resp. 24,1 %) [28]. To je v rozporu se zjištěním Younga a kol. ve studii [26] popsané výše, kde se WHC v závislosti na frakci cihelné drti zásadně lišila.

Vijayaraghavan a Joshi [30] prezentují velmi dobré výsledky WHC (49,5 %) v substrátu se zastoupením 20 % cihelné drti frakce 4-10 mm v kombinaci s 30 % perlitu (0.25–1 mm), 20 % vermiculitu (0.5–2 mm), 10 % písku (0.25–1 mm), 10 % kokosového textilního vlákna a 10 % hnědé mořské řady (*T. conoides*) [30]. Rešerše Ampim a kol. [37] hodnotí cihelnou drť jako materiál použitelný pro substráty zelených střech s dobrou schopností zadržovat vodu. Recyklát na bázi betonu vychází v tomto ohledu v porovnání s cihelnou drtí hůře, ale přesné hodnoty rešerše neuvádí [37]. V porovnání s [26] a [28] je v substrátu [30] použito jen čtvrtinové množství cihelné drti a dosažená WHC dosahuje přibližně dvojnásobné hodnoty než v substrátech s 80 % cihelné drti.

Z předchozího textu je zřejmé, že dosud nepanuje shoda nad otázkou jak nastavit poměr stavebního recyklátů k ostatním složkám, případně jakým materiálem složky nahradit pro dosažení optimálního množství využití cihelné drti, která může být dodána jako recyklát.

3.5.3 Vliv biouhlí na vodní režim

V laboratorním experimentu s testy ve skleníku [24] byl testován různý objemový obsah (0, 10, 20, 30 a 40 %) biouhlu ze zeleného odpadu v substrátu pro zelené střechy. Majoritní složkou substrátu byla vulkanická struska (Scoria) bez a s 20 % příměsí organického podílu ve formě kokosového vlákna. Bylo zjištěno, že s rostoucím obsahem biouhlu se lineárně snižovala objemová hmotnost substrátu a zvýšila jeho retenční schopnost (Obrázek 1).



Obrázek 1: Závislost WHC na obj. zastoupení biouhlu v substrátu dle experimentu Cao a kol. [24]

Substrát s organickou příměsí ve formě kokosového vlákna vykazoval v závislosti na množství biouhlu hodnotu WHC mezi 51,9 a 79,1 %, substrát složený jen z vulkanické strusky s příměsí biouhlu vykazoval hodnoty WHC od 30,8 do 53,6 %. Organická složka tak prokazatelně zvýšila WHC substrátu. 40 % obsah biouhlu dokázal v substrátu mocnosti 10 cm zadržet dodatečných 2,3 cm dešťové vody a tato voda byla dostupná pro rostliny. Aplikace 30 % biouhlu byla optimální pro dosažení optimálních podmínek dostupnosti vody pro rostliny a oddálení dosažení bodu vadnutí [24]. Navýšení retenční schopnosti přidáním biouhlí potvrzuje i studie [18] na zkušebních plochách zelených střech, kde bylo prokázáno, že přidáním 7 % biouhlí původem z rýžových slupek, skořápek ořechů a pneumatik může být retence zvýšena v průměru o 4,4 %. Publikace [15] o použití biouhlu v australském zemědělství hovoří o aplikaci na pole v množství od 0,2 do 116 t/ha v závislosti na pěstované plodině s převážně pozitivními výsledky na produkci a schopnost zadržet vodu.

Odtok z venkovních experimentálních ploch zelených střech s biouhlem v experimentu Kuoppamäki a Lehvävirtab [19], podrobněji popsáném v kapitole 3.5.5, byl při některých srážkových událostech až o polovinu nižší než z ploch bez biouhlu. Při jiných epizodách se příliš nelišil. Souvrství s biouhlem bylo výrazně lepší z hlediska zadržování vody oproti souvrství obsahující jen substrát s drcenou cihlou.

3.5.4 Vliv cihelné drti na chemizmus substrátů

Karczmarczyk a kol. [29] v laboratorním experimentu a pak na zkušebních plochách zelených střech zkoumal vliv substrátu s objemovými 35 % cihelné drti, 20 % drceného vápence a 45 % písku s celkovou

objemovou hmotností 1.52 g/cm³ na emise fosforu po zalití vodou z vodovodu. Kromě prvního zavlažení byly na odtoku měřeny jen nulové koncentrace P-PO₄. Médiem omezující emise fosforu byl v tomto případě drcený vápenec.

Cihelná drť i biouhel jsou zásadité materiály. Cihelná drť při měření pH vykazala hodnotu 7,8 [19], ale v závislosti na množství zásadité vápenné malty, která může být přítomná zejména v recyklátu cihelné drti, se může hodnota lišit. Recyklát na bázi betonu hodnotí rešerše v porovnání s cihelnou drtí ještě hůře. Navíc cihelnou drť uvádí jako stabilní materiál [37].

3.5.5 Vliv biouhlí na chemismus substrátů

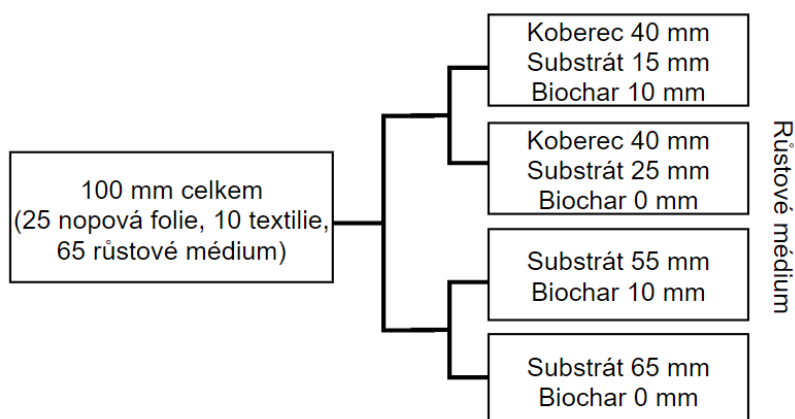
Ve finské studii [16] zaměřené na měření odtoku z nově instalované zelené střechy bylo zjištěno, že v odtoku je obsah nutrientů vyšší než v dešťové vodě. Biouhlí nedokázalo snížit koncentraci nutrientů v odtoku ze zelené střechy, ale zapříčinilo snížení jejich kumulativního odtoku. Tento paradox lze vysvětlit snížením celkového odtoku vody ze zelené střechy s biouhlem. V laboratorním experimentu prezentovaném ve stejné studii simulujícím souvrství zelené střechy v nádobě 18×18 cm o výšce 10 cm, naplněné 2 cm substrátu překryté vrstvou biouhle uzavřeného v síťce o mocnosti cca 9 mm a znovu překrytého 2 cm substrátu složeného z 85 % z recyklované cihelné drti, 5 % kompostu, 5 % drcené kůry a 5 % mechu a 3 cm vysokou vrstvou rozchodníkové rohože navrchu, byl zkoumán vliv dvou různých biouhlů na kvalitu odtoku. Biouhel A vzniklý pyrolýzou břízy (plocha povrchu 7 m²/g, pH 7,6, WHC 77 %) a použitý rovněž v experimentu na reálné zelené střeše koncentrace nutrientů snížil, kdežto biouhel B, jehož materiálový původ není v článku uveden (plocha povrchu 140 m²/g, pH 9,2, WHC 163 %), naopak koncentrace zvýšil. Je tedy zřejmé, že ve vlastnostech různých druhů biouhlů mohou být zásadní rozdíly [16].

V rámci dalšího experimentu bylo zjištěno, že přidání 7 hm. % biouhlí, tvořeného ze 70 % z rýžových slupek a skořápek ořechů a ze 30 % z pyrolyzovaných pneumatik, do substrátu vedlo většinou k významnému snížení obsahu nutrientů vyplavovaných odtokem dešťové vody. Byla měřena koncentrace nutrientů vytékajících z ploch bez vegetace (jen substrát), osazených rozchodníky (*Sedum*) a travinami (*Ryegrass*). Na plochách osazených rozchodníky byla redukce vyplavovaných nutrientů zpravidla nižší než u holého substrátu a travin. Obsah vyplavovaných dusičnanů aplikací biouhlu na plochách s rozchodníky dokonce vzrostl [18]. Přehled koncentrací v odtokové vodě k nahlídnutí v *tabulce 2*.

Tabulka 2: Vliv aplikace 7 obj. % biouhlí na množství vyplavovaných nutrientů [18]

Vegetace	Biouhel	Dusičnany (NO ₃ ⁻)	Fosforečnany (PO ₄ ³⁻)	Celkový fosfor	Celkový dusík	Organický uhlík	Anorganický uhlík
	[Ano/Ne]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Bez vegetace	Ne	178,0	19,8	22,1	-	139,8	17,4
	Ano	36,5	11,2	12,8	-	38,7	15,2
	% redukce	79	43	42	-	72	12
S vegetací: <i>Sedum</i>	Ne	17,9	7,3	10,3	-	78,8	13,3
	Ano	22,5	7,3	8,3	-	25,7	12,7
	% redukce	-26	1	20	-	67	4

Kuoppamäki a Lehvävirtab [19] ve Finsku na experimentálních plochách o rozměru 2x1 m se sklonem 7 % také testoval obsah nutrientů v odtokové vodě v závislosti na způsobu osazení vegetací (sazenice + semena vs. koberec) a přítomnosti vrstvy biouhlí původem z březové kůry. Tomuto experimentu se budeme věnovat podrobněji, neboť se charakterem výrazně podobá experimentu prováděnému v rámci této práce.



Obrázek 2: Skladba experimentálních segmentů zelených střech [19]

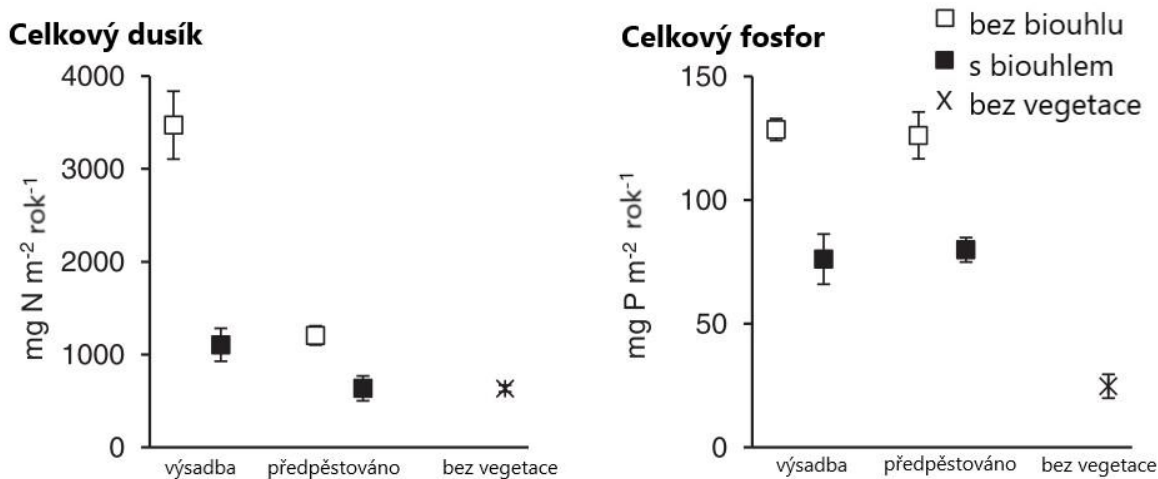
Vegetační souvrství mělo vždy mocnost 100 mm a skládalo se z 25 mm vysoké nopové folie, na níž ležela 10 mm tlustá textilie (1280 g/m²) s retenční schopností 81 l/m². Na textilií byl umístěn substrát složený z 85 % podílu drcených cihel (objemová hmotnost 1.3 g/m³), 5 % kompostu, 5 % rašeliny a 5 % drcené kůry. Na této vrstvě substrátu pak ležela buď předpěstovaná vegetační rohož tloušťky 40 mm nebo bylo do hloubky 50 mm umístěno 10 mm biouhle, případně oboje. Hloubka 50 mm byla zvolena s ohledem na dostupnost vody pro rostliny. Mocnost substrátu se tak lišila na základě přítomnosti vrstvy biouhlí a předpěstované vegetační rohože. Vrstva biouhlí ve vrstvě substrátu, případně i rohože, odpovídala přibližně 15 obj. %. Zrnitostní složení cihelné drti je uvedeno v tabulce 3. Přehled testovaných kombinací na obrázku 2.

Tabulka 3: Zrnitostní složení cihelné drti použité v [19]

Frakce [mm]	<0,25	0,25 – 0,50	0,50-1,00	1,00-2,00	2,00-4,00	>4,00
Cihelná drť [%]	13,9	12,8	17,2	18,8	20,9	16,5

Výsledkem experimentu bylo zjištění, že koncentrace dusíku a fosforu v odtokové vodě u ozeleněných segmentů jsou výrazně vyšší než u střeš bez vegetace (segmenty se substrátem bez vegetace). Nejpravděpodobnějším zdrojem nutrientů v odtokové vodě ze zelených střeš, zejména v letech po založení, je počáteční přihnojení [38]. Avšak v tomto experimentu hnojeno nebylo. V předpěstované vegetaci však může být hnojivo přítomno z výroby [39]. Nicméně toto zjištění je v rozporu se zjištěním [18], kde byly koncentrace nutrientů vyšší u ploch bez vegetace.

Účinek biouhlu na snížení obsahu nutrientů v odtokové vodě se lišil v čase. Na podzim byl jeho vliv zanedbatelný, ale v létě přispíval k snížení vyplavovaných nutrientů N a P. Z jara a v průběhu vegetační sezony bylo obecně množství vyplavovaných nutrientů vyšší. V segmentech osazených sazenicemi a osetých semeny byl účinek biouhlu na snížení vyplaveného dusíku vyšší než u rozchodníkového koberce [19]. Relativně nižší účinek měl biouhel na redukci vyplavovaných nutrientů při osazení rozchodníky i v experimentu popsaném výše ve studii [18]. Spíš než koncentrace nutrientů v odtoku byly ve studii [19] sníženy celkové roční úhrny vyplavovaných nutrientů (celkový dusík o 62 % a celkový fosfor o 28 %), což je souhlasně publikováno ve studii [16] popisující částečně stejný experiment.



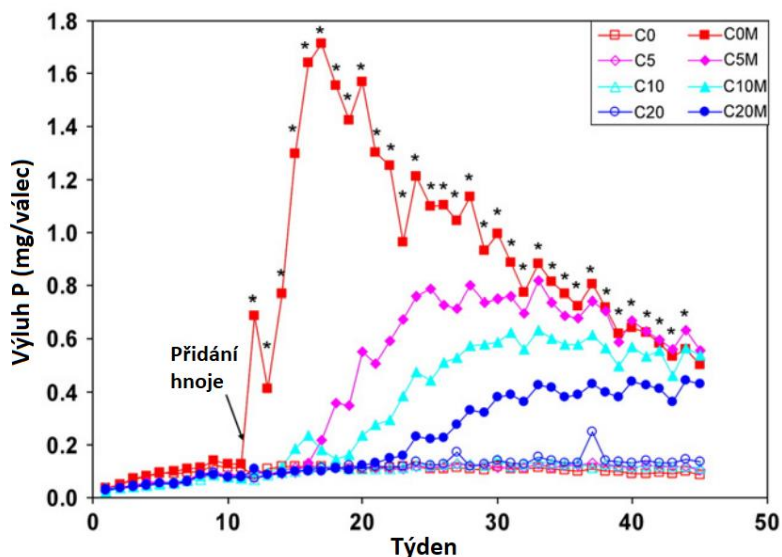
Obrázek 3: Průměrné roční úhrny vyplavovaných nutrientů N a P z experimentálních ploch zelených střeš na m², převzato z [19] (upraveno)

Z obrázku číslo 3 jsou patrné roční emise celkového dusíku a celkového fosforu z experimentálních ploch. Ty činí v případě celkového dusíku na ploše bez biouhlu přibližně 1200 mg za rok, v případě plochy s biouhlem pak přibližně 800 mg a rok. Emise celkového fosforu činí na ploše bez biouhlu přibližně 130 mg/rok, na ploše s biouhlem pak 80 mg/rok.

Pro získání dalších dat byly odebrány kontrolní vzorky odtokové vody z již existujících zelených i standardních (bitumenových či kovových) střeš. Sklon střešy, stáří ani obsah organické hmoty (org. hm. v substrátu <15 %) se neukázal pro koncentrace N a P v odtokové vodě jako podstatný faktor. Potvrdilo se však, že koncentrace nutrientů N a P jsou v odtoku ze zelených střeš výrazně vyšší než ze standardních střeš. Koncentrace celkového dusíku a fosforu v odtoku ze zelených střeš se pohybovaly okolo 4,8 mg/l resp. 0,9 mg/l. V pitné vodě byla naměřena koncentrace 0,5 mg N/l a fosfor nebyl detekován vůbec. Další výzkum v oblasti je zapotřebí, protože v ojedinělých případech byla koncentrace fosforu v odtoku ze segmentů s biouhlem vyšší než v segmentech bez biouhlu. Souvislost s teplotou a velikostí srážky je nepravděpodobná. Jako možné vysvětlení je uveden rozvoj mikrobů na biouhlu [19].

Podobně překvapující výsledek v souvislosti se zvýšeným vyplavováním nutrientů z ploch obohacených o biouhel byl zjištěn ve studii [18]. Týkal se ovšem zvýšeného vyplavování dusičnanů. Přínos aplikace biouhlí však ve většině případů převládá. Je tomu důkazem i studie [25] s použitím substrátu s 10,5 % příměsí biouhlí z kokosových skořápek pyrolyzovaných při 600 °C. Odtok ze zelené střechy s biouhlím vykazoval výrazně nižší hodnoty celkového dusíku: 9,85 mg/l oproti 16,14 mg/l bez přidání biouhlí. Snížení vyplavovaného dusíku o cca 40 % ve studii [25] řádově odpovídá měření ve studii [19], kde došlo ke snížení o 62 %. Celkový vyplavovaný fosfor byl ve studii [25] podobný s i bez biouhlí, stejně tak objem zadržené srážkové vody (72 %). Hodnoty chemické spotřeby kyslíku byly cca poloviční v případě přidání biouhlí (171,79 mg/l oproti 97,31 mg/l) [25].

V laboratorním válcovém experimentu [40] byl zjišťován dopad příměsí biouhlu původem z tvrdého dřeva na výluh nutrientů ze zemědělské půdy, typické pro americký středozápad. Experiment probíhal po dobu 45 týdnů a v průběhu experimentu byl do některých z válců přidán hnůj. Týdně byla dolévána voda simulující srážku 4,29 cm. Byla testována příměs 0; 5; 10 a 20 g biouhlu na 1 kg půdy. Odtok ze vzorku s přidáním hnoje bez příměsí biouhlu byl zakalenější než ostatní, což indikovalo zvýšený výluh rozpuštěného organického uhlíku (DOC). Výluh nutrientů K, Mg, Zn Ca a celkového dusíku z válců bez přidání hnoje stoupal s rostoucím podílem biouhlu, což indikuje, že alespoň část nutrientů v biouhlu je mobilní. Ve válcích s přidáním hnoje však výluh nutrientů P, Mg, Si a celkový dusík s rostoucím podílem přidání biouhlu klesal. Výluhy nutrientů Ca a K stoupaly i s přidáním biouhlu. Ve směsi 20 g biouhlí na 1 kg zemědělské půdy a 5 g hnoje (tj. 2 hm. % biouhlí) se snížil výluh celkového dusíku o 11 % a výluh celkového fosforu o 69 % [40]. Takto rapidní snížení vyplavovaného fosforu při tak nízkém zastoupení biouhlí je v porovnání s dalšími studiemi překvapivě vysoké (např. [25] bez redukce P; [19] o 28 %; v [18] o 42, resp. 20 %). V žádných studiích však nebyl přidáván do směsi přímo hnůj a zdroj nutrientů byl původem nejspíš z počátečního přihnojení souvrství. Navíc se většinou nejednalo o zemědělskou půdu, ale o substrát zelených střech.



Obrázek 4: Výluh P ze zemědělské půdy při válcovém experimentu v závislosti na přidání biouhlu a hnoje, převzato z [40], (upraveno)

Některé typy biouhlí mohou obsah nutrientů v odtoku dokonce zvyšovat. Zejména pokud jsou původem z minerálně bohatého materiálu jako je například hnůj či podestýlka. Biouhlí původem z rostlin má o řád až dva řády nižší obsah nutrientů dusíku, fosforu a draslíku než biouhlí z kravského hnoje a slepičí podestýlky. Nutrienty mohou být v některých případech dostupné až v průběhu času

a některé vůbec [15]. Porovnání vlastností vybraných biouhlí používaných v Austrálii je k nahlédnutí v *tabulce 4* . Přehled vlivu biouhlí na snižování výluhu dusíku a fosforu ze zelených střech v *tabulce 5*.

Tabulka 4: Přehled složení a vlastností biouhlů použitých v zemědělství v Austrálii [15]

Původ biouhle	N %	P %	K %	C %	pH výluhu	Konduktivita [dS/m]	Teplota pyrolýzy [°C]
Zelený odpad	0,14-0,21	0,01-0,07	0,06-0,82	36-78	4,9*; 7,3-9,4	0,13-3,2	350-600
Kravský hnůj	1,2	0,3	1,9	73	9,4	-	500
Slepičí podestýlka	2,0-3,5	2,4-3,6	2,8-5,9	38-42	8,9-10,1	5,6	400-550

*nižší teplota pyrolýzy (350 °C), i pro další biouhlí v [15] lze u nižších teplot pyrolýzy pozorovat nižší pH

Tabulka 5: Vliv příměsí biouhlu na procentuální snížení vyplavovaných nutrientů P, N [%] ze substrátů a půdy

Obj. % biouhlí	Celkový fosfor	Celkový dusík	Dusičnany	Poznámka	Autor
7.0	42.0	-	79	bez vegetace, jen dusičnany	[18]
7.0	20.0	-	-26	s vegetací, jen dusičnany	[18]
15.0	28.0	62.0		10 mm vrstva ~ 15 obj. %	[19]
10.5	Bez snížení	39.9			[25]
2.0	69.0	11.0			[40]

Biouhel je dle studie [41] rovněž poměrně účinný při odstraňování mikropolutantů. Filtr plněný biouhlem dokáže odstranit podobné množství reziduí léčiv a dalších mikropolutantů jako pískové filtry při jeho cca desetinové objemové hmotnosti.

Porovnání pH různých druhů biouhlí je prezentováno v Australské publikaci [15] včetně příkladů mnoha měření pH. Kyselost různých druhů biouhlí se obvykle pohybovala v neutrálním až mírně zásaditém rozsahu (Tabulka 4). S rostoucí teplotou pyrolýzy se formovalo více CaCO_3 , které po reakci s vodou tvoří zásaditý Ca(OH)_2 [15]. Hodnota pH u biouhlí se může lišit podle vstupního materiálu pyrolýzy. Biouhlí z rýžových slupek při měření pH vykazovalo hodnotu 8,0 [42]. Kyselost jiného biouhlí z břízy (*Betula spp.*) pyrolyzovaného při cca 400 °C na dvě hodiny byla změřena na hodnotu 8,4 [19]. Kyselost kohoutkové vody o pH 8,1 použité na závlahu nebyla na odtoku ze zelené střechy v průměru pozměněna [19]. To, že měl substrát s obsahem biouhlí větší neutralizační kapacitu než substrát bez biouhlí, potvrzuje další studie [25].

3.5.6 Shrnutí vlivu recyklovaných materiálů v substrátech zelených střech

Až na dvě výjimky se experimenty prováděné v nalezených člancích nezabývají současným použitím směsi biouhlu a cihelné drti pro využití v substrátu zelené střechy. Výjimkou je finský experiment [19] a [16], kde byl však biouhel použit jako samostatná vrstva a nebyl přímo zamíchán do směsi substrátu. Z rešerší nejčastěji vyplývá, že biouhel zvyšuje retenční kapacitu směsi [24], [19], a snižuje vyplavování mnoha druhů nutrientů [18], [19]. Naopak zelené střechy mohou zvyšovat množství vyplavovaných nutrientů do prostředí v porovnání se standartními střechami. V ojedinělých případech substrát s příměsí biouhlí zvýšil množství vyplavovaných dusičnanů [18], jinde ojediněle zvýšil množství vyplaveného celkového fosforu [19]. Většinou ale dochází aplikací biouhlu ke snížení vyplavovaných nutrientů. Snížení výluhu celkového fosforu o 69 % v studii [40] je překvapivě vysoké v porovnání s dalšími studiemi: [25] bez redukce P; [19] snížení o 28 %; v [19] o 42 %, resp. 20 %. Efekt biouhlu na vyplavování nutrientů tak nabývá poměrně velkého rozptylu. Většinou se množství aplikovaného biouhlu pohybuje okolo 10 %, ale zkoumána byla i příměs 40 %. Cihelná drť byla v různých studiích použita v množství 35-85 %. Dlouhodobý efekt působení biouhlí musí být dále sledován [19], neboť experimenty nepokrývají období delší jednoho roku. Prostor pro další výzkum je i v oblasti využití recyklované cihelné drti pro substráty zelených střech. Většina studií se zabývá použitím drcených cihel. Nejsou však označeny jako recyklát a jedná se tak nejspíš především o vadné kusy z výroby. Ve studii [26] byla navíc zjištěna závislost velikosti frakce cihelné drti na WHC, to se ale ve studii [28] neukazuje.

3.6 Šedá voda

Zhoršením kvality vody lidskou činností vzniká odpadní voda [43]. Tyto vody lze dělit na komunální odpadní vody a průmyslové odpadní vody. Pro komunální odpadní vody, mezi něž se řadí i srážková a šedá voda, se často používá názvosloví odvozené podle barev [44].

3.6.1 Co je šedá voda

Šedá voda (ŠV) je komunální odpadní voda pocházející z umyvadel, koupelen, praní prádla a kuchyňských dřezů. Nejedná se o vodu pocházející ze záchodů a neobsahuje tak fekálie a moč [45]. V takovém případě hovoříme o vodě černé, resp. žluté vodě. Přecházením šedé vody vzniká tzv. bílá voda [46]. V této práci je však častěji používán jen termín „šedá voda“ či „předčištěná šedá voda“. Šedé vody můžeme dále dělit na vody tmavě šedé (myčky, pračky, kuchyňský dřez) a světle šedé s nižším obsahem znečištění (sprchy, vany, umyvadla) [4].

3.6.2 Proč šedou vodu recyklovat

Recyklace šedé vody pro použití na aktivity nevyžadující vodu pitnou nahrazuje spotřebu pitné vody, kterou může snížit až o 40 % a navíc omezí nápor na čistírnu odpadních vod, což může řešit problém s její kapacitou a odbourat např. limit v rozvoji výstavby [4]. Ve státech s rychle rostoucí populací může taková recyklace přispět k řešení nedostatku pitné vody [47] související s rostoucím fenoménem sucha. Přitom sucho ve světě není problém, který by se nás netýkal. Už i mainstreamová média občas uvádí tento problém jako jednu z příčin současných vln migrace, a i v českých podmínkách nastávají období, kdy je vody nedostatek, je zakazováno například napouštění bazénů a některé obce musí být zásobovány cisternami s pitnou vodou. Nároky na pitnou vodu přitom mohou být recyklací šedé vody a decentralizací systému zásobování vodou sníženy. To platí jak v chudších státech [48], tak ve státech s vyššími příjmy, kde nedostatek pitné vody nepředstavuje existenční problém, ale minimálně může vést k úspoře finančních prostředků a zlepšení ekologického stavu například využitím pro závlahu. Čištění a využití šedé vody pro závlahu zelených střech, fasád a zahrad není dosud příliš častým řešením a to přesto, že rostliny mohou v závislosti na druhu spotřebovat 0,5 až 20 l vody na m² za den [4]. Vody, která je často dodávána z vodovodního řadu. Šedou vodu lze rovněž využít jako zdroj tepla pro předehřátí další vody [49] přes tepelný výměník, případně pro tepelné čerpadlo.

Současný systém nakládání s odpadními vodami domácností pracuje na principu ředění znečištění při splachování toalet a následným mísením s dalšími typy odpadních vod. Šedá voda je přitom nejméně znečištěná odpadní voda, pomíneme-li srážkovou vodu. Její čištění na jednotku objemu je energeticky efektivnější, pokud nedojde k mísení s více znečištěnou žlutou a černou vodou a čistírna čistí koncentrovanější znečištění [4]. Dalším logickým krokem k udržitelnému nakládání s vodami je tak oddělení šedých vod coby „nejméně znečištěných“ a po vyčištění je využít jako tzv. bílou vodu např. pro zalévání, splachování toalet, mytí automobilů či zabahněných kol.

3.6.3 Množství a kvalita šedé vody

Proporcionální produkce ŠV je ve státech s nižšími příjmy srovnatelná s produkcí ve státech s vyššími příjmy. Státy s vyššími příjmy však spotřebovávají pitné vody víc, což ve výsledku vede i k větší produkci ŠV. To vede i k lepší kvalitě ŠV ve státech s vyššími příjmy [50]. Průměrná denní produkce šedé vody lze stanovit podle předpokládaných denních činností v objektu, nebo na základě počtu měrných jednotek (obyvatel, lůžko, osoba) a typu objekt (bytový dům, hotel, atd.) [51].

Složení šedých vod bylo již mnohokrát testováno [4]. Co se objemu vyprodukovaných odpadních vod týče, tvoří šedá voda po dešťových vodách největší objem odpadních vod, jejich znečištění organickými látkami a patogenními organizmy není velké a obsahují jen malé množství živin, hormonů a léčiv [52].

Koncentrace kovů jsou však vyšší než u směsné splaškové vody. Produkty osobní péče, čisticí prostředky a barviva zvyšují koncentrace těžkých kovů, chlóru a celkového organického uhlíku [4]. Z faktorů, na základě kterých tyto produkty zákazník pořizuje a které se následně dostanou do ŠV, jako je značka a cena, není možné určitě jasnou spojitost s kvalitou vzniklé ŠV. Ani produkty označené jako ekologické nebyly shledány méně toxickými [53].

3.6.4 Zdravotní rizika spojená s využíváním šedé vody

Šedá voda má velký potenciál, ale také určitá rizika pramenící z faktu, že se jedná o vodu odpadní. V nevyužitě a nevyčištěné šedé vodě se množí bakterie a je vhodné ji tedy využít nebo vyčistit do 24 hodin od jejího vzniku [54]. Jako nejčastěji sledovaný patogen v šedé vodě je často uváděna E. Coli [55], což je fekální koliformní bakterie a jako taková se ve vodě dále nemnoží na rozdíl od koliformních bakterií obecně. Sleduje se ale také Salmonella, Legionella a další bakterie a viry [56] [57]. Virům je však věnována menší pozornost [50]. Obvykle není cílem upravovat šedou vodu na parametry pitné vody, ale spíše její využití jako vody užitkové. I při takovém požití by ale potenciálně mohlo dojít k zdravotnímu ovlivnění uživatelů. Bylo proto zkoumáno riziko nákazy inhalací infikovaným aerosolem šedé vody obsahující Legionellu při dvou nejčastějších využitích šedé vody v domácnosti, tzn. v souvislosti se zavlažováním zahrady a splachováním WC. Studie [57] byla prováděna na třech domech s předčištěním vertikální kořenovou čistírnou a v jednom domě s pasivně provzdušňovaným biologickým filtrem. V každém objektu byly odebírány 4 vzorky vody a to z vodovodu, ze sběrné nádoby na ŠV, ŠV předčištěné bez chlorace a s chlorací. Dopad použití předčištěné a chlorované ŠV byl vyjádřen pomocí DALY indexu (Disability-Adjusted Life Years) jako hodnota 10^{-4} ($10^{-4} \times 365 \times 24 = 0,876$ hodin) při využívání na závlahy, resp. 10^{-5} při využití na splachování WC. Studie tak ukázala, že vyčištěná šedá voda ošetřená chlorací nepředstavuje zvýšené riziko oproti použití pitné vody. Voda nevyčištěná, nebo vyčištěná, ale bez ošetření chlorací představovala o 1 až 2 řády vyšší riziko nákazy. Pro splachování WC je však riziko u upravené nechlorované vody přijatelné [57]. Splachování WC vidí jako nejbezpečnější způsob využití ŠV i rešeršní studie [4], která navíc zmiňuje častou kontaminaci ŠV léčivými, mikropolutanty a dalšími patogeny. Patogeny jsou dle této publikace největším rizikem.

Studie [58] zkoumala rizika dopadu na zdraví v souvislosti s využitím šedé vody pro splachování a závlahu plodin určených ke konzumaci. Odděleně byla zkoumána šedá voda z koupelny, prádelny a kuchyně a analyzována simulací Monte Carlo. Výsledky ukázaly, že pro splachování toalety je po jednoduchém předčištění mikrofiltrací (odstraňuje bakterie [56]) možné použít všechny tři typy šedé vody a použití na splachování WC obecně představuje nižší rizika než jiné použití. Celkově nejnižší rizika plynou z šedé vody původem z koupelny, naopak nejrizikovější je šedá voda kuchyňská. Pro závlahu zemědělských plodin je šedá voda rovněž vhodná s vyloučením vody z kuchyně [58]. To že je ŠV původem z kuchyně ta rizikovější potvrzuje i izraelská studie [59]. Izraelská studie říká, že zásadní vliv na bezpečnost šedé vody z hlediska překročení bezpečnostních limitů stanovených WHO [60] má vyloučení tmavě šedé vody s kuchyňskými odpady a kvalitní návrh systému hospodaření s šedou vodou. Při splnění těchto podmínek vyhoví průměrný systém i bez desinfekce vody, avšak desinfekce se přesto doporučuje instalovat pro případ horšího návrhu jako pojistka bezpečnosti [59].

3.6.5 Čištění šedé vody

Technologie čištění šedé vody jsou na trhu dostupné a mohou zajistit kvalitní čištění. Podle článku [54] lze systémy zpracování šedé vody rozdělit do čtyř kategorií:

- 1) Bez čištění – někdy také jako „laundry to landscape“ – přímé využití v zahradě bez delšího meziskladování. Tento způsob může být legislativně komplikovaný z důvodu relativně vysoké biologické spotřeb kyslíku (BSK) a výskytu E. Coli.

- 2) Samotná filtrace – často při upotřebení vody do 24 hodin. Obvyklé jsou tkaninové filtry s oky 5–100 μm . Jemnější filtry vyžadují častější údržbu, ale dosahují lepších výsledků čištění.
- 3) Filtrace v kombinaci s desinfekcí. Desinfekci nejčastěji provádíme pomocí chloru či ozonu.
- 4) Biologické čištění s filtrací (+ popř. desinfekce) – tj. membránový bioreaktor skládající se z biologického provzdušňovacího stupně v kombinaci s filtrem – když je prostupnost filtru menší než 0,2 μm neprojdou ani bakterie a výpadek chlorace neznámá zásadní problém.

Čištění na principu technologie popsané v bodě 4 vč. desinfekce doporučuje řešerše [61] o čištění šedých vod jako nejekonomičtější a nejschůdnější řešení. Další možností může být čištění vody v umělém mokřadu, neboli kořenové čistírně. Tato varianta může být instalována samostatně, nebo v kombinaci s některou ze zmíněných technologií čištění.

Umělý mokřad je na mnoha aplikacích ověřený systém využívající přirozených přírodních procesů k čištění odpadních vod. Za příznivou cenu a nízkých provozních nároků na energii, může být dosaženo velmi dobrých čistících výsledků. Umělé mokřady se často používají při malých aplikacích v situacích nerovnoměrného nátoků odpadních vod, ale existuje i mnoho velkých, například obecních, kořenových čistíren odpadních vod. Čištění funguje na principu delšího zdržení čištěné vody, sedimentaci, aktivitě mikroorganismů, rostlin a bakterií a to i při odstraňování dusíku a fosforu. Umělé mokřady jsou při správném návrhu, kdy nesmí být podceněna zejména dimenze mokřadu, známou dobrou schopností snižovat biologickou spotřebu kyslíku (BSK₅), obsah rozpuštěných částic a nutrientů. Naopak k jejich slabostem patří riziko nevyrovnané efektivity čištění při sezónních změnách počasí, velký nárok na prostor a riziko množení komárů [62].

Umělé mokřady se dají dělit na systémy s povrchovým a podpovrchovým prouděním vody. Mokřady s podpovrchovým prouděním dále můžeme rozlišit podle směru proudění na horizontální a vertikální [62].

Standardně je před umělý mokřad čistící obecní či domovní odpadní vody předsazováno mechanické čištění například ve formě septiku nebo pokročilejší formy sedimentačních technologií [63]. Jedná se však o případ čištění směsných komunálních vod, s předpokladem vyšší kalnosti než u šedé vody.

V umělém mokřadu roste vegetace, která se podílí na procesu čištění. Vegetace potřebuje pro přežití a růst nutrienty. Ty mohou být dodány v ŠV a rostlinou přijmuty kořenovým systémem. Takovýto způsob biofiltrace pracuje na principech oxidace, filtrace, sedimentace, adsorpce a mikrobiální asimilace [4]. Umělé mokřady mohou být velmi efektivní při odstraňování znečištění z šedých vod. Dle článku [64] může efektivita odstraňování fosforu a dusíku v umělém mokřadu dosahovat od 3 do 99 %, v průměru pak 50 %. Experiment ve zmíněném článku [64] probíhal v celkem 72 nádobách umožňující drénování vody. Nádoby byly osazeny různou kombinací mokřadní vegetace do půdy s vysokým organickým podílem odebrané z reálného mokřadu. Experiment ukázal, že během vegetační sezony je účinek výrazně lepší než v chladných měsících. Tento výkyv lze minimalizovat vhodnou výsadbou a tepelným odizolováním mokřadu. V experimentu [64] byly použity čtyři druhy mokřadních rostlin: ostřice jezerní (*Carex lacustris*), skřípinec z čeleni ostřice (*Scirpus validus*), chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) a orobinec širokolistý (*Typha latifolia*). Stejně rostliny s doplněním dalších druhů jako například zblochan vodní (*Glyceria maxima*) či blatouch bahenní (*Caltha palustris*) doporučuje i přehled vhodných rostlin na webu [65].

Významnou roli v návrhu systému umělého mokřadu hraje volba filtračního média. Lehké filtrační médium v mokřadu slouží jako báze pro bakterie čistící vodu [4]. Čištění vody totiž neprobíhá jen díky rostlinám samotným, ale velkou mírou díky mikroorganismům žijícím v půdě, popřípadě v mokřadu a je tak důležitá volba růstového média. Pomalu filtrující jemnozrnné materiály jako kokosové vlákno a

minerální vlna vykazovaly velmi dobré filtrační schopnosti při válcovém filtračním experimentu, ale měli tendenci k rychlému zanášení. Hrubozrnné materiály naopak nedosahovaly tak dobrých výsledků při snižování znečištění v šedé vodě, ale neměly problém se zanášením. Perlit byl vyhodnocen jako nejlepší z hrubozrnných materiálů z hlediska snižování znečištění v kombinaci s nízkou úrovní zanášení a jeho kombinace s kokosovým vláknem by mohla být efektivním základem růstového média zelených stěn zavlažovaných šedou vodou [4].

3.6.6 Vliv šedé vody na půdu

Metabolická aktivita mikroorganismů v půdě měřená jejich respirací byla přidáním produktů denní potřeby (šampony, sprchové gely, krémy, zubní pasty atd.) v neupravené šedé vodě většinou zvýšena. Což je pro čistící schopnost půdy pozitivní. Výjimkou byly vysoké dávky některých sprchových gelů. Nižší dávky stejných sprchových gelů však aktivitu mikroorganismů zvýšily [53].

Studie [66] vyjadřuje obavu ze zvýšení vodoodpudivosti půdy vlivem tenzidů. To, že dlouhodobé užívání neošetřené šedé vody pro zavlažování ovlivňuje vlastnosti půdy tvrdí i rešeršní studie [4].

3.6.7 Legislativa pro nakládání s šedými vodami

V současnosti žádná česká ani evropská norma tuto problematiku nepostihuje. V přípravě je norma prEN 16941 – 2: Systémy pro využití upravené šedé vody [67], [55].

Vzhledem k absenci národní nebo evropské normy je při navrhování systémů hospodaření s šedou vodou vhodné přihlídnout k některé ze zahraničních norem. Ze zahraničí lze využít i příručku vydanou Světovou zdravotnickou organizací „Safe use of wastewater, excreta and greywater – excreta and greywater use in agriculture“ [68].

Britská norma BS 8525-2:2011 uvádí kromě technických požadavků i požadavky z hlediska zdravotních rizik. Rozlišuje limity pro činnosti, kde vzniká aerosol (postřik) a kde nevzniká (aplikace bez postřiku). Vybrané hodnoty jsou k nahlédnutí v *tabulce 6*. Z normy vyplývá, že limity pro využití postřikem jsou mnohonásobně přísnější, než je tomu při aplikaci bez postřiku.

Tabulka 6: Limity bakteriální kontaminace ŠV dle anglické normy BS 8525-2:2011, převzato z [54]

Parametr x [KTJ/100 ml]	Aplikace postřikem		Aplikace bez postřiku	
	Tlakové mytí, zahradní rozstřikovač a mytí vozidel	Splachování WC	Zavlažování zahrad *)	Praní
<i>E. coli</i>	nezjištěno	250	250	nezjištěno
Střevní enterokoky	nezjištěno	100	100	nezjištěno
<i>Legionella pneumophila</i>	10	–	–	–
Koliformní bakterie celkem	10	1000	1000	10

*) Pokud by voda byla použita v zelinářských zahradách, měly by být informace o úpravě těchto plodin před použitím poskytnuty odběratelům (doporučení pro vaření, loupání, o důkladném mytí v pitné vodě apod.)

KTJ – kolonie tvořící jednotku

Americká norma NSF/ANSI 350-:2014 popisuje jak má vypadat bezpečně upravená ŠV a to jak z hlediska zdraví pro uživatele, tak pro dlouhodobou spolehlivost trubicích systémů. Upravená ŠV je podle této normy bez zápachu a bezpečná i po 6 měsících, kdy ve vodě nesmí docházet k růstu bakterií [54]. Pro upravené vody jsou stanoveny limity celkových nerozpuštěných látek (NL_{celk}), Chemické

spotřeby kyslíku (CHSK), zákalu a E. Coli. Zmíněné limity dle normy NSF 350 jsou k nahlédnutí v *tabulce 7*.

Tabulka 7: Limity znečištění surové a vyčištěné ŠV dle americké normy NSF 350, převzato z [54]

	Surová šedá voda (voda z koupelny a prádelny)	Upravená voda (průměrné hodnoty podle NSF 350)
NL _{celk.} (ppm)	80–160	< 10
CHSK (ppm)	130–180	< 10
zákal (NTU)	50–100	< 2
<i>E. Coli</i>	100–1000	< 2,2

Problematika nakládání s odpadními vodami se posouvá směrem k jednoznačnější legislativní úpravě. Tento posun je pozvolný. Není však vyloučeno, že i hospodaření s šedou vodou se časem prosadí více jako tomu bylo při nedávném legislativním zakotvení priorit hospodaření s dešťovou vodou ve vyhlášce č. 501/2006 Sb., kde jsou priority definovány následovně: 1. vsakování na místě -> 2. regulovaný odvod oddílnou kanalizací do vodoteče -> 3. regulovaný odvod jednotnou kanalizací.

3.6.8 Příklad hospodaření s šedou vodou

Pěkným příkladem využívání šedých vod v bytové výstavbě v ČR je projekt Botanica K 3,4 společnosti Skanska, kde díky systému recirkulace šedé vody z van a umyvadel pro splachování bylo ušetřeno v prvním roce 26 % pitné vody. Předčištění ŠV je zde řešeno sedimentací, ultrafiltrací a následnou chlorací [69].

4 Návrh a testování substrátů s podílem recyklovaných materiálů

Tato kapitola popisuje metodiku návrhu substrátů, poměry v nich použitých materiálů a laboratorní analýzy provedené na navržených a připravených substrátech.

Bylo navrženo 16 variant inovativních substrátů se zastoupením stavebního recyklátu na bázi cihelné drti a pyrolyzovaného čistírenského kalu. Byly stanoveny hydrofyzikální charakteristiky těchto substrátů a dva z nich (V2-5 a V2-8) byly přímo použity na experimentálních plochách zelených střech s mokřadním předčištěním závlahy šedou vodou v Brně, což je popsáno v kapitole 5. Stejně dva substráty byly dále použity při realizaci zelené střechy na budově přírodního koupaliště v Třešti popsané v kapitole 7.

4.1 Návrh a příprava substrátů

Na základě rešerše a předchozí zkušenosti byly vybrány materiály, jejichž směs a množství by mohly být vhodné pro použití v substrátech pro zelené střechy. Podmínkou bylo využití recyklovaného kameniva a biouhlu původem z pyrolyzovaného kalu. Byly vytvořeny dvě verze substrátů (V1 a V2) lišící se druhem recyklovaného kameniva a druhem majoritní organické složky (kompost, resp. rašelina). První verze substrátů (V1) obsahovala recyklované kamenivo s významnou částí betonového recyklátu a kompost, kdežto druhá verze substrátů (V2) obsahovala recyklované kamenivo s převážným podílem recyklované cihelné drti a rašelinu. Pro obě dvě verze materiálů bylo připraveno 8 různých substrátů s proměnlivým podílem expandovaného jílu, drcené opuky, kompostu/rašeliny, „betonové“ (V1)/„cihelné“ (V2) drti a biouhlu. Za účelem zvýšení přesnosti byly substráty definované objemovým způsobem (*tabulka 8 a 9*, obj. %) míchány hmotnostně (g) na základě známé objemové hmotnosti jednotlivých složek.

Tabulka 8: Procentuální objemové zastoupení jednotlivých materiálů v 8 variantách střešního substrátu V1

Číslo varianty	Expandovaný jíl	Drcená opuka	Kompost	Cihelná drť V1	Biouhel
1	30.0	55.0	15.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	15.0	85.0	0.0
3	8.8	16.2	15.0	60.0	0.0
4	17.6	32.4	15.0	35.0	0.0
5	15.9	29.1	15.0	0.0	40.0
6	21.2	38.8	15.0	0.0	25.0
7	26.5	48.5	15.0	0.0	10.0
8	14.1	25.9	15.0	35.0	10.0

Tabulka 9: Procentuální objemové zastoupení jednotlivých materiálů v 8 variantách střešního substrátu V2

Číslo varianty	Expandovaný jíł	Drcená opuka	Rašelina	Cihelná drť V2	Biouhel
1	29.7	54.5	15.8	0.0	0.0
2	0.0	0.0	14.2	85.8	0.0
3	8.1	14.9	14.6	62.4	0.0
4	16.7	30.6	15.1	37.5	0.0
AdMaS P2 - 5	13.3	24.4	25.0	37.3	0.0
6	21.0	38.5	15.8	0.0	24.8
7	26.2	48.1	15.8	0.0	9.9
AdMaS P1 - 8	13.4	24.5	15.1	37.5	9.5

Objemové zastoupení materiálů v substrátu aplikovaném na experimentální plochy na AdMaS, VUT v Brně (dále jen v Brně) odpovídá na ploše P1 (s biouhlem) substrátu 8 z varianty V2. Na ploše P2 (bez biouhlu) odpovídá složení substrátu 5 z varianty V2.

Kyselá rašelina byla neutralizována granulovaným dolomitem v množství 0.027 kg dolomitu na 1 kg rašeliny.

Pro substrát s příměsí biouhlu V2-8 použitý na experimentální ploše P1 v Brně byl registrován užitečný vzor [70].

4.2 Laboratorní analýzy substrátů

Na všech 16-ti vzorcích připravených substrátů byla změřena maximální vodní kapacita, objemová hmotnost a retenční čáry půdní vlhkosti. Analýzy byly provedeny na obou sadách vzorků V1 a V2. U substrátů použitých v Brně bylo rovněž změřeno pH, konduktivita půdního výluhu a zrnitost složení. Substráty byly v laboratoři připraveny ze vstupních materiálů ve stanovených hmotnostních poměrech, v množství dostatečném pro měření MVK, objemové hmotnosti a retenčních čar. Pro sledování zrnitosti byl odebrán vzorek při realizaci experimentálních ploch v Brně a pro pH vzorek z realizace ZS v Třešti. Laboratorní analýzy byly provedeny v laboratoři hydroopedologie na budově UCEEB v Buštěhradě a ve školních laboratořích Fakulty stavební ČVUT na katedře k143.

4.2.1 Objemové hmotnosti složek substrátů

V laboratoři byla dle ve Standardů pro navrhování, provádění a údržbu [22] stanovena objemová hmotnost materiálů ve stavu po zhutnění 6-ti údery standardním Proktorovým kladivem o hmotnosti závaží 4,5 kg z předepsané výšky 45 cm za přirozené vlhkosti materiálů. Zkouška byla prováděna v plastové nádobě o známém objemu 2,9 l. Objem vzorku byl stanoven měřením výšky po zhutnění na 4 místech. Změřené objemové hmotnosti (*Tabulka 10*) byly použity při následné přípravě substrátů.

Tabulka 10: Objemové hmotnosti použitých materiálů V1 a V2

Název materiálu	ρ po hutnění [kg/m ³]
Cihelná drť – s větší příměsí betonu (V1)	1320.0
Expandovaný jííl	508.7
Drcená opuka 4-8 mm	993.1
Biouhel	786.2
Rašelina – respektive kompost (V1)	578.1
Cihelná drť – čistější, (V2)	1165.6
Rašelina – kyselá, (V2)	543.7



Obrázek 5: Vzorky materiálů použitých pro přípravu substrátů po zhutnění za účelem měření objemové hmotnosti

4.2.2 Maximální vodní kapacita a objemové hmotnosti substrátů

Maximální vodní kapacita (MVK) je široce používaná charakteristika vyjadřující schopnost střešních substrátů zadržovat vodu. MVK a objemová hmotnost substrátů byly změřeny na všech 16 variantách substrátů typu V1 a V2 v jednom opakování dle standardizované FLL [23] zkoušky a dle Standardů pro navrhování, provádění a údržbu vegetačních souvrství zelených střech od Buriana a kol. [22].

Směs zhutněná Proctorovým kladivem, v nádobě s perforovaným dnem o průměru 15 cm a výšce 16,5 cm, tak, aby po zhutnění výška substrátu v nádobě dosahovala alespoň 10 cm, byla sycena pod vodou po dobu 24 hodin. Následně byl vzorek umístěn na plochu umožňující jeho drénování. Drénování probíhalo po dobu 2 hodin. Vzorek byl následně zvážen, přesunut do hliníkové nádoby a při 105 °C sušen do dosažení konstantní hmotnosti, při které byl opět zvážen.



Obrázek 6: Perforované dno nádoby na měření MVK, zhutňování vzorku Proctorovým kladivem, měření výšky vzorku po zhutnění (zleva)

MVK [% obj.] byla vypočítána z rovnice [2]:

$$MVK = \frac{(m_{MVK} - m_s) \cdot 100}{V} \quad [2]$$

kde m_{MVK} je hmotnost [g] vzorku nasyceného na MVK, m_s je hmotnost [g] suchého vzorku a V je objem vzorku [cm³].

Objemová hmotnost suchého vzorku je definována jako podíl hmotnosti suchého vzorku a objemu vzorku. Objemová hmotnost při nasycení vzorku na maximální vodní kapacitu je definována jako podíl hmotnosti vzorku nasyceného na maximální vodní kapacitu a objemu vzorku.

Maximální vodní kapacita (MVK) je definována jako rozdíl hmotnosti vzorku nasyceného na maximální vodní kapacitu a hmotnosti suchého vzorku ku objemu vzorku. Výsledná maximální vodní kapacita substrátu se udává v jednotkách % objemu.

Tabulka 11: Objemová hmotnost a MVK substrát V1

Číslo substrátu:	MVK	Objemová hmotnost		Množství zadržené vody
		suchá	při MVK	
	[% obj.]	[g/l] = [kg/m ³]		[g/l] = [kg/m ³]
1	56.6	695.8	1262.0	566.3
2	43.0	1171.6	1601.1	429.5
3	49.3	1062.9	1555.7	492.7
4	53.6	907.1	1443.3	536.2
5	52.0	737.0	1256.9	520.0
6	54.3	723.1	1265.6	542.6
7	59.0	736.3	1326.0	589.7
8	50.7	911.9	1418.7	506.7

Tabulka 12: Objemová hmotnost a MVK substrátů V2

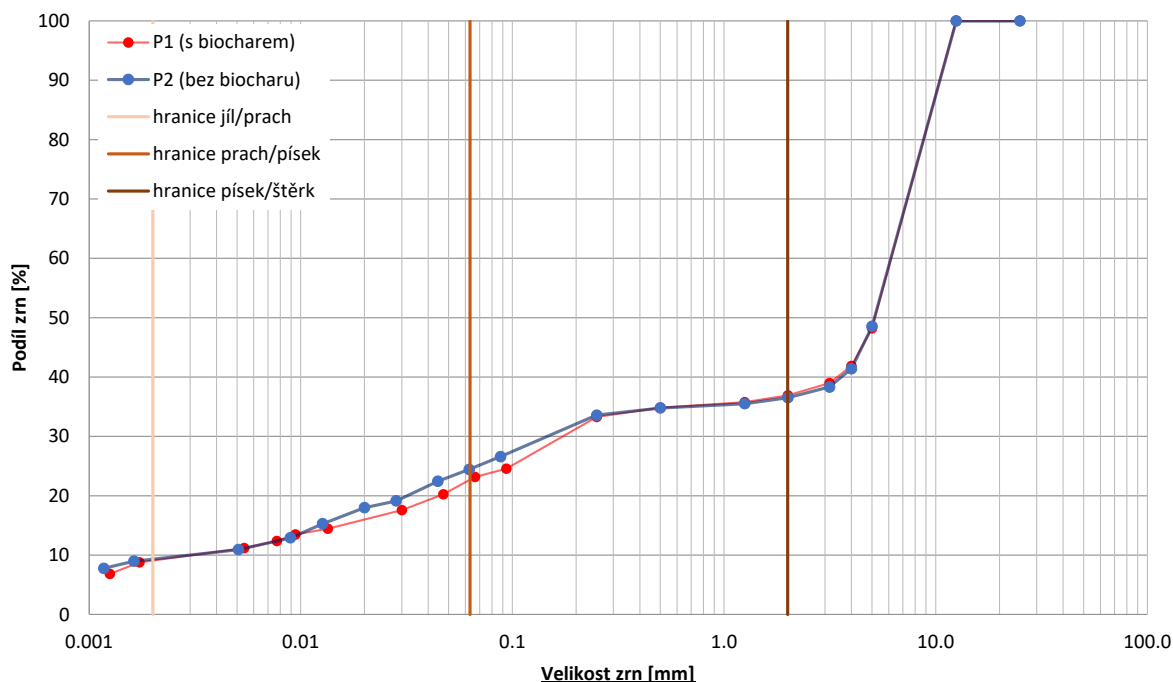
Číslo substrátu:	MVK	Objemová hmotnost		Množství zadržené vody
		suchá	při MVK	
	[% obj.]	[g/l] = [kg/m ³]		[g/l] = [kg/m ³]
1	47.4	670.0	1143.9	473.9
2	30.8	1068.2	1376.4	308.2
3	37.6	966.7	1342.4	375.7
4	43.6	868.4	1304.4	436.0
AdMaS P2 - 5	48.2	818.8	1300.4	481.7
6	47.7	618.8	1095.4	476.6
7	48.8	637.4	1125.4	488.0
AdMaS P1 - 8	41.6	821.9	1238.4	416.5

Z měření vyplývá, že MVK u substrátů V1 je obecně vyšší než u substrátů V2. Současně s tím ale substráty V1 mají většinou vyšší objemovou hmotnost. S rostoucím zastoupením cihelné drti V1 i V2 se MVK snižuje a objemová hmotnost zvyšuje. Pro přehlednění výsledků jsou hodnoty MVK a objemové hmotnosti při MVK barevně označeny. Hodnoty MVK v odstínech červené představují nižší MVK, modré naopak vyšší. Nižší objemová hmotnost při MVK je značena odstínem zelené barvy, vyšší MVK pak odstínem červené.

4.2.3 Zrnitost

Byla změřena zrnitost substrátů. Pro analýzu byla použita Casagrandeho sedimentační metoda a prosévání na sítích.

Porovnání čar zrnitosti na *obrázku 7* ukazuje, že oba substráty jsou si v tomto ohledu velmi podobné. Majoritní část substrátu, konkrétně přes 50 hm. %, se u obou verzí substrátu zachytila na síti s průměrem oka 5 mm.



Obrázek 7: Čára zrnitosti plochy P1 (s biouhlem) a P2 (bez biouhlu)

4.2.4 Kyselost substrátů a konduktivita výluhu

Bylo změřeno pH substrátu č. 8 (s biouhlem) a č. 5 (bez biouhlu) z druhé sady V2 použitého na ploše P1 a P2 v Brně. Bylo měřeno aktivní a výměnné pH a konduktivita půdního výluhu. Výsledné hodnoty zobrazuje *tabulka 13*.

Tabulka 13: Měřené hodnoty pH a konduktivity půdního výluhu substrátů č. 8 a 5 V2

	č. 8 V2 (P1) s biouhlem	č. 5 V2 (P2) bez biouhlu
pH (aktivní)	6.95	6.27
pH (výměnné)	6.53	5.85
Konduktivita půdního výluhu (μS/cm)	1168	895

4.2.5 Retenční čáry

Retenční čáry byly měřeny pro obě sady substrátů V1 a V2 popsané v *tabulkách 11 a 12*. Pro každý ze 16 navržených substrátů byla provedena tři opakování (A, B, C), celkem bylo tudíž měřeno 48 vzorků. Vzorek V1 2A se bohužel v průběhu měření poškodil a výsledek není k dispozici. V době odevzdání této práce ještě nebyly retenční čáry pro substráty V2 doměřeny a výsledky V2 tak nejsou součástí této práce. Výsledky pro substráty V1 jsou uvedeny v této kapitole.

Měření retenčních čar probíhalo na vzorcích v ocelovém válečku o průměru 5,4 cm a výšce 5 cm. Všechny vzorky byly stejnoměrně hutněny pomocí standardního Proctorova kladiva s redukovanou výškou pádu 2,2 cm. Jako redukce na velikost vzorku byla použita plastová lahvička naplněná vodou. Sestava je zobrazena na *obrázku 8*.



Obrázek 1: Sestava pro hutnění vzorku na měření retenční čáry



Obrázek 2: a gravitační podtlakový aparát

Měření retenčních čar probíhalo ve dvou krocích. Pro sací tlakové výšky 0 až 33 cm (= 0,033 bar) byl využit podtlakový aparát zobrazený na *obrázku 9*. Pro sací tlakové výšky 0,1 až 15 bar byl použit přetlakový aparát zobrazený na *obrázku 10*. Celkem bylo změřeno 11 bodů retenční čáry pro každý vzorek.

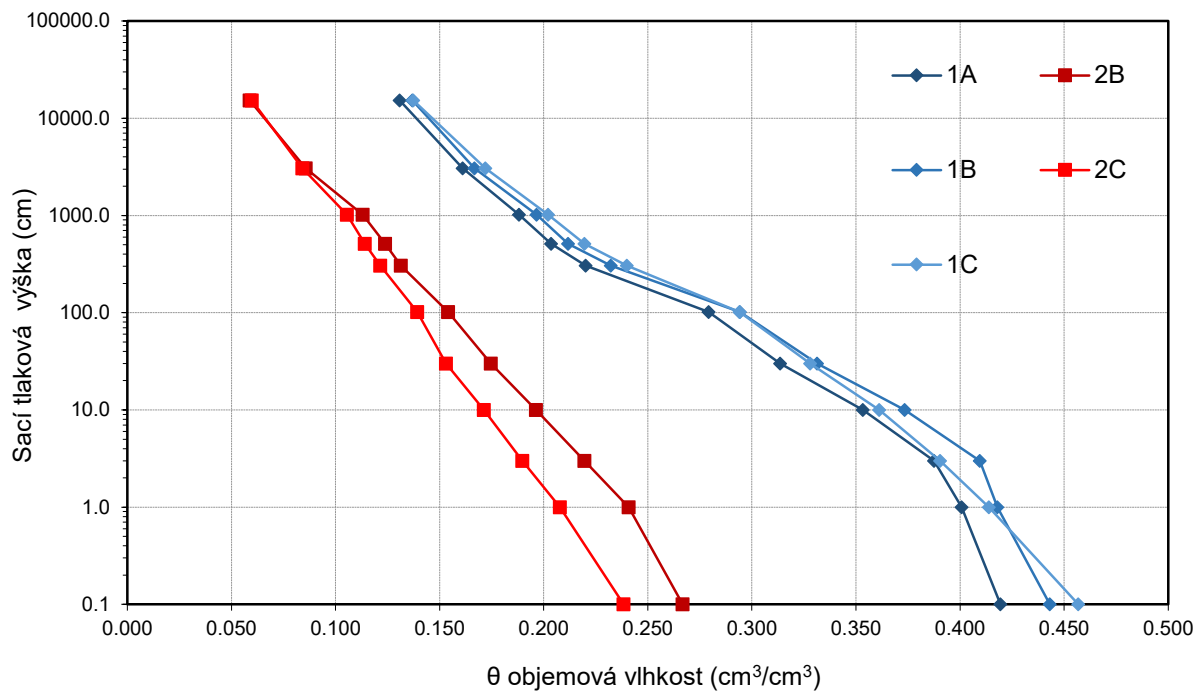


Obrázek 3: Přetlakový aparát

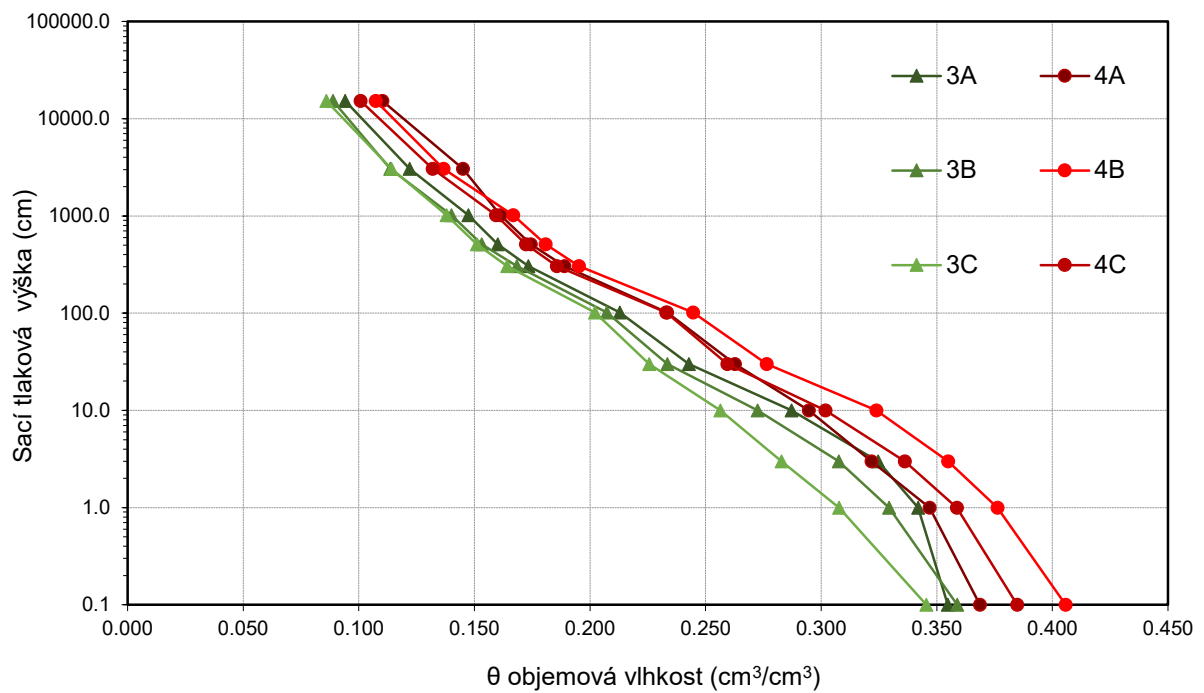


Obrázek 4: vzorky substrátů na keramické desce pro měření retenčních čar

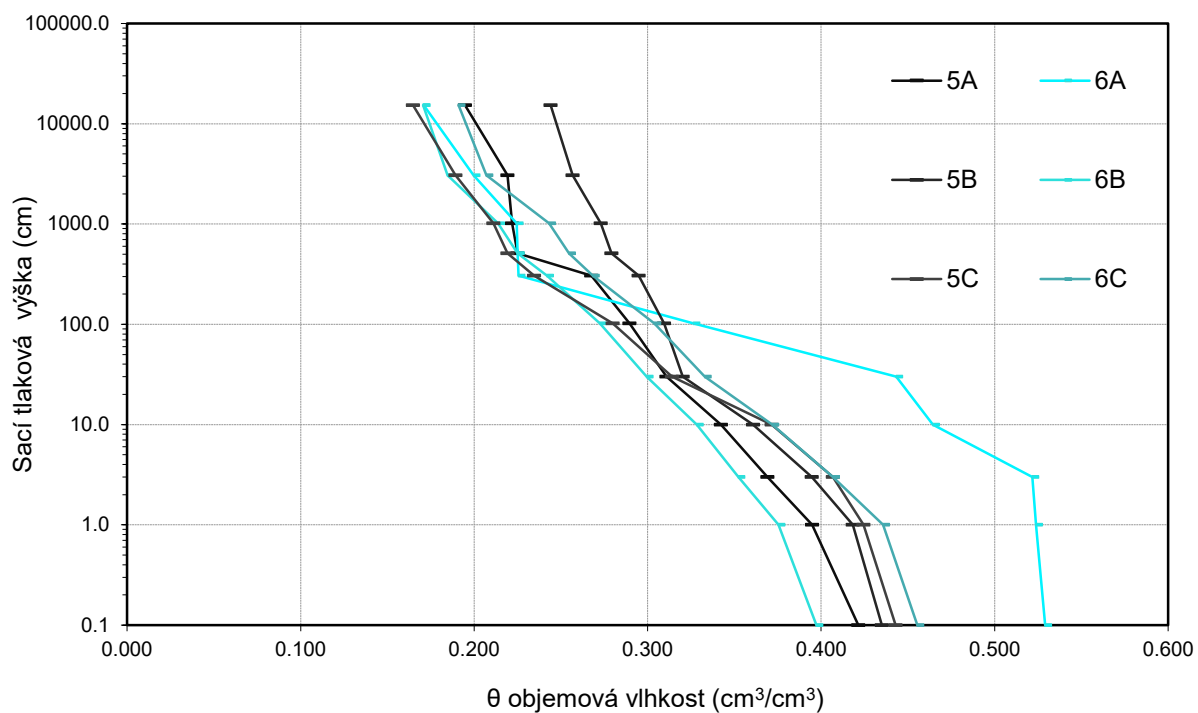
Změřené retenční čáry navržených substrátů V1



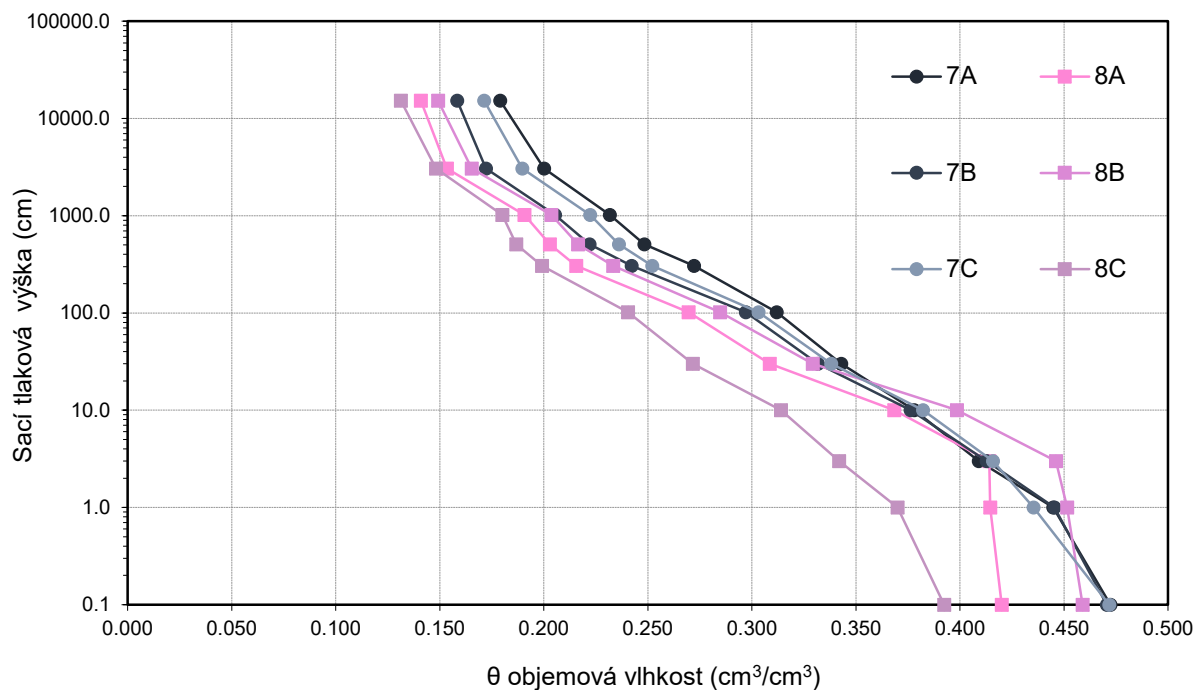
Obrázek 12: Retenční čáry pro substráty 1 V1 a 2 V1



Obrázek 13: Retenční čáry pro substráty 3 V1 a 4 V1



Obrázek 14: Retenční čáry pro substráty 5 V1 a 6 V1



Obrázek 15: Retenční čáry pro substráty 7 V1 a 8 V1

4.3 Porovnání navrženého substrátu s nabídkou vybraných střešních substrátů na trhu

V této podkapitole je porovnán navržený substrát s biouhlem použitý na ploše P1 (V2-8) s vybranými substráty běžně dostupnými na českém trhu.

Tabulka 14: Porovnání navrženého substrátu s biouhlem s komerčně dostupnými substráty

	V2-8	ACRE lehký*	ACRE těžký*	Optigreen E lehký**	Optigreen E těžký**
MVK [%]	41,6	35-55	40-50	min 35	min 35
OH suchá [kg/m³]	822	480–900	900–1100	min 750	min 1000
OH při MVK [kg/m³]	1238	900–1400	1400–1600	max 1450	max 1800
pH	6,5 - 7,0	6,5-8,5	6,5-8,5	6,0-8,0	6,0-8,0

*ACRE extenzivní substrát při použití ve vícevrstvé skladbě ZS [71]; ** [72]; OH – Objemová hmotnost

Substrát ACRE se skládá z drcené opuky (spongilitu), expandovaného jílu a rašeliny. Hlavními složkami substrátu Optigreen jsou expandovaná břidlice, láva, pemza, expandovaný jíl, cihelná drť a zelený kompost.

MVK všech substrátů se pohybuje mezi 35 a 55 % a navržený substrát tedy výrazně nevybočuje. Navržený substrát je lehčí než maximální hodnoty těžkých i lehkých substrátů. Změřená suchá a mokrá (při MVK) hodnota OH se pohybuje v horní části intervalu lehké varianty substrátu ACRE. Pro substrát Optigreen E jsou udány jen minimální a maximální hodnoty OH. Změřené hodnoty navrženého substrátu ale opět spíše spadají do lehké varianty substrátu Optigreen E. Z hlediska pH je navržený substrát v porovnání s ACRE a Optigreen E spíše kyselější.

5 Experimentální testování mokřadně-extenzivní zelené střechy

Na základě výrobní dokumentace z diplomové práce Ing. Jana Pipty byly vyrobeny a na Univerzitní centrum energeticky efektivních budov Českého vysokého učení technického v Praze, (UCEEB-ČVUT) externě dodány dvě nerezové vany. Na pracovišti UCEEB-ČVUT byly nerezové vany zkompletovány, usazeny na podstavce a doplněny o měřicí zařízení, jejichž funkčnost byla ověřena. Poté byly experimentální sestavy převezeny na místo sběru dat do areálu partnera výzkumného projektu na výzkumné centrum AdMaS, Vysokého učení technického v Brně. V Brně byly experimentální sestavy naplněny substrátem, osazeny vegetací a bylo instalováno měření a dávkování závlahy šedou vodou, měření odtoku a obě ploch byly osazeny sadou vlhkostních a teplotních čidel a odtok z plochy P1 i sondou s měřením teploty a konduktivity. První měření byla spuštěna 17. června 2020 a postupně byla zapojována další a systém byl optimalizován. 30. října byl experiment zazimován. Paralelně probíhalo v těsné blízkosti měření meteorologických veličin.

Tato kapitola detailně popisuje průběh realizace experimentu, experimentální sestavu, metodiku a výsledky experimentů.

5.1 Instalace experimentální sestavy

V této kapitole je popsána příprava a instalace experimentu, která nejdříve probíhala v prostorách UCEEB-ČVUT a následně se přesunula na výzkumné centrum AdMaS do Brna.

5.1.1 Přípravné práce provedené na UCEEB-ČVUT

Nerezové vany byly v přípravné hale v prostorách UCEEB umístěny na předpřipravené polystyrenové podstavce opláštěné cementotřískovými Cetris deskami. Byla ověřena těsnost svarů, navržena a cvičně zkompletována měřicí a čerpací aparatura a následně ověřena funkčnost systém.

Vany byly osazeny okapovými žlaby pro zachycení vody vytékající ze sestavy. Stav před a po jejich instalaci je vidět na *obrázku 16*. Zachycený výtok je sestavou redukci a spojek veden na překlopný průtokoměr (*Obrázek 17*), který je kabelem připojen do měřicí ústředny jako pulzní vstup. Připojení k měřicí ústředně a parametrizace ústředny byly testovány ještě před transportem do Brna.



Obrázek 16: Nerezová vana po dodání (vlevo); Nerezová vana po osazení okapovými žlaby (vpravo)



Obrázek 17: Detail sestavy pro sběr a měření odtoku z experimentální sestavy

5.1.2 Instalace v areálu AdMaS

Celá monitorovací fáze experimentu probíhala na AdMaS v Brně a veškerý potřebný materiál a zařízení tak byl z UCEEB-ČVUT přemístěn do Brna a na místě sestaven a uveden do provozu

5.1.2.1 Umístění experimentu

Materiál byl transportován v několika etapách jak externím dopravcem, tak naším realizačním týmem před samotnou instalací. Na samostatných paletách byla přepravena nádrž na šedou vodu, nerezové vany s podstavci a materiály pro substráty. Menší a citlivější zařízení byla transportována společně s realizačním týmem v den instalace experimentu 17.6.2020.

Experimentální sestava byla umístěna před budovou AdMaS v Brně na adrese Purkyňova 139, Brno. Vhodné místo bylo vybráno tak, aby co nejlépe odpovídalo slunným podmínkám běžné zelené střechy. Zastínění okolními budovami a vegetací bylo nežádoucí. Bylo vybráno místo, kde zastínění nehraje významnou roli, avšak v ranních a večerních hodinách není zcela vyloučeno. Přesná lokalizace experimentu je na GPS souřadnicích 49°14'8.170"N, 16°34'14.093"E.

Po nalezení vhodného místa byly obě experimentální plochy vyrovnány pomocí vodováhy a metru do podélného sklonu 5 % dle předchozího hydraulického návrhu. K vypodložení byly využity dřevěné odřezky a kusy betonové dlažby.

5.1.2.2 Instalace experimentální sestavy

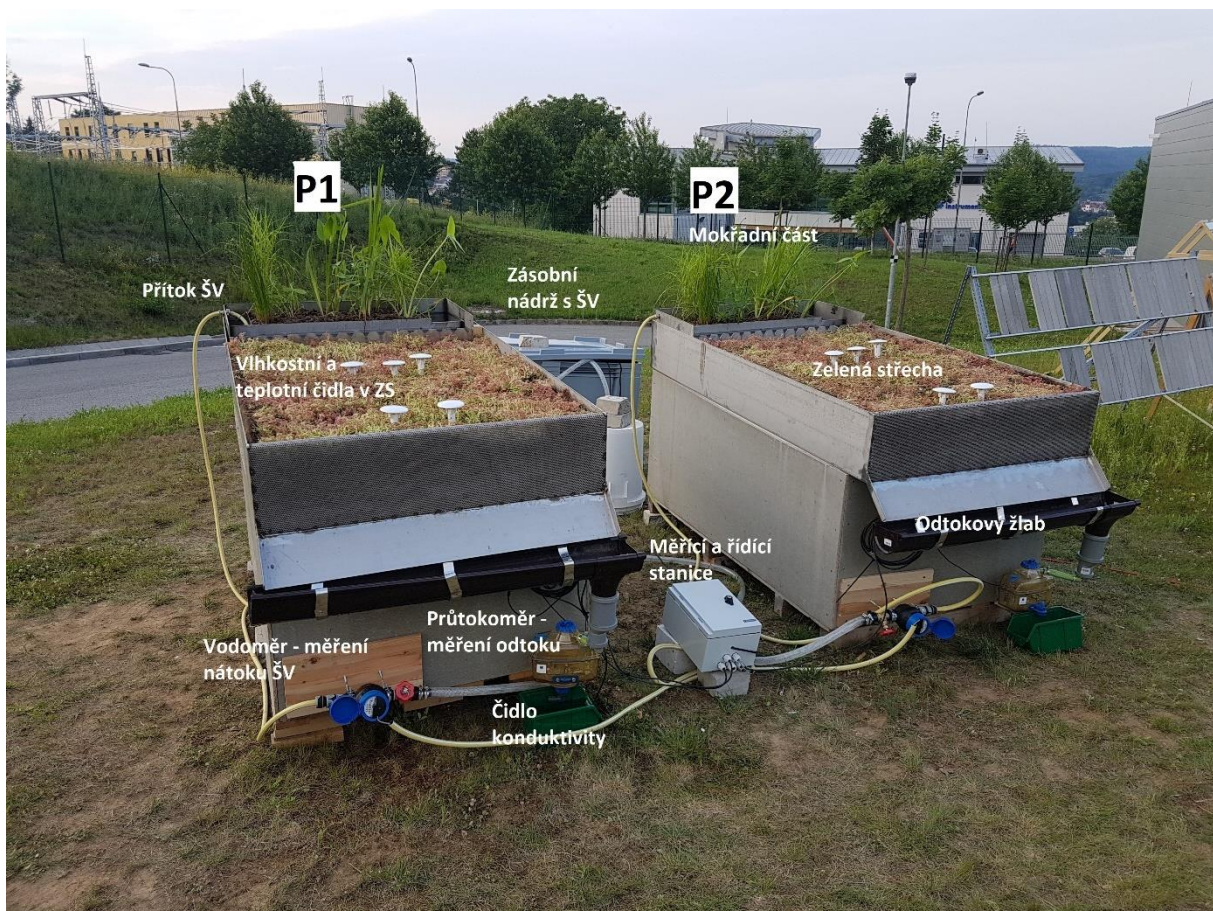
Obě vany byly osazeny navrženými vrstvami popsány v kapitole 5.2 a dvěma druhy substrátů. Mokřadní část i zelená střecha byly osazeny vegetací.

Jednotlivé složky substrátu byly míchány na místě pomocí ručního spirálovitého míchadla na maltové směsi. Materiál byl dávkován za využití váhy s přesností 10 g. Hmotnost dávkovaných materiálů byla dopočtena na základě tabulky specifikující objemové zastoupení materiálů v navržených substrátech (*Tabulka 8*) a známých objemových hmotností materiálů (*Tabulka 10*).



Obrázek 18: Příprava substrátu, homogenizace směsi (vlevo); Navažování materiálu pro přípravu substrátu (uprostřed); Úprava velikosti vegetační rohože (vpravo)

Experimentální zelené střechy byly osazeny dávkováním závlahy šedé vody, měřením nátoků a odtoků, vlhkostními a teplotními čidly. Celkový pohled na experimentální sestavu po instalaci 17.6.2020 je zobrazen na obrázku 19 a jednotlivé prvky jsou podrobněji popsány v kapitole 5.2.



Obrázek 19: Celkový pohled na experimentální sestavu po instalaci 17.6.2020 s popisem zařízení

5.2 Popis experimentální sestavy

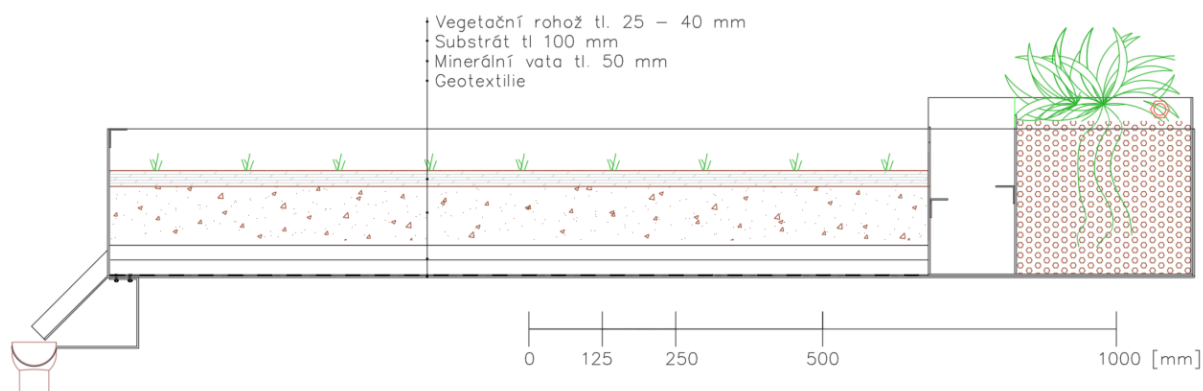
Experimentální sestava (Obrázek 19) se skládá ze dvou hlavních částí. Z hlediska průtoku vody představuje první část umělý mokřad, ze kterého voda přetéká na zelenou střechu. Směr proudění vody v experimentální sestavě je šipkami znázorněn na půdorysném nákresu na obrázku 24. Ve stejném obrázku jsou rovněž popsány jednotlivé části sestavy.

V této kapitole je popsána experimentální sestava včetně měřících zařízení na ní osazených.

5.2.1 Mokřadně-extenzivní zelená střecha

Umělý mokřad (v řezu na obrázku 20 vpravo a na obrázku 21) je tvořen zatopeným prostorem naplněným přibližně 50 l expandovaného jílu frakce 8-16 mm (keramzitu) a osazeným vybranými mokřadními rostlinami, jejichž přehled je zobrazen v tabulce 15.

Část experimentální plochy určená pro zelenou střechu je tvořena několika vrstvami popsány v řezu na obrázku 20 vlevo. Na nerezové konstrukci vodotěsné vany vyrovnané na podélného sklonu 5 % je umístěna geotextilie, na ni minerální vata tloušťky 5 cm, na vatě leží přibližně 10 cm substrátu s podílem recyklovaných materiálů vlastního návrhu. Na vrstvu substrátu byla umístěna vegetační rozchodníková rohož¹ dodaná společností SEDUM TOP. Vegetační rohož tvořená kokosovým vláknem protkaným polypropylenovou sítkou obsahuje 5-8 druhů rozchodníků a je tlustá 2,5 až 4 cm. V závislosti na nasycení dosahuje hmotnosti 12-18 kg /m².













Obrázek 20: Podélný řez experimentální sestavou, (upraveno z diplomové práce Jana Pipty, 2020)

¹ http://sedumtop.cz/wp-content/uploads/2018/09/technickylist_sedumntopmatS5_2018_08.pdf



Obrázek 21: Umělý mokřad v průběhu instalace

Tabulka 15: Přehled osazených rostlin mokřadní části experimentálních ploch

				
Ostřice palmová <i>Carex muskingumensis</i>	Skřípípec jezerní <i>Scirpus lacustris</i>	Modráška kopinatá <i>Pontederia cordata</i>	Zevar vzpřímený <i>Sparganium erectum</i>	Ostřice palmová <i>Carex muskingumensis</i>
				
Sítina rozkladitá <i>Juncus effusus</i>	Kyprej vrbice „Pink Tails“ <i>Lythrum salicaria</i>	Kosatec žlutý <i>Iris pseudacorus</i>	Kyprej vrbice „Pink Tails“ <i>Lythrum salicaria</i>	Šípatka široolistá <i>Sagittaria latifolia</i>

Šedá voda použitá pro závlahy experimentálních ploch pochází z budovy výzkumného centra AdMaS v Brně. Konkrétně z šaten (umyvadla a sprchy), záchodů (umyvadla), kuchyněk (umyvadla), vybraných umyvadel v laboratořích a vzduchotechniky (kondenzát).

5.2.2 Měření nátoky a odtoku

Pro čerpání předčištěné šedé vody do mokřadní části experimentální sestavy byla vytvořena aparatura (Obrázek 22) sestávající z ponorného kalového čerpadla GÜDE GS 4002 P, hadice, škrtkového ventilu pro regulaci průtoku, vodoměru RTK-HYX Compos. DN15 (WEHRLE)² s pulzním čidlem s rozlišením čtení 1 litr a hadice pro přivedení regulovaného průtoku do mokřadní části. Dávkování závlahy bylo v průběhu experimentu upravováno. Odtok byl měřen překlopným průtokoměrem značky Metergroup modelové

² Objemový vodoměr pro studenou vodu: <https://www.enbra.cz/vodomer-wehrle-rtk-hyx-compos-dn15-q3-2-5-mid-sv>

řady KIPP100³ s rozlišením 100 ml. Na ploše P1 byla instalována sonda ESV11⁴ pro měření konduktivity a teploty. Stav po instalaci je zobrazen na *obrázku 19*.

Všechna zmíněná měření z obou ploch byla napojena na měřicí ústřednu Fiedler H3⁵.



Obrázek 22: Předpřipravená aparatura pro čerpání předčištěné šedé vody do mokřadní části experimentální sestavy před instalací

Měřicí ústředna byla před transportem na do Brna parametrizována pro binární záznam času každého proběhlého pulzu jak z vodoměru, tak překlopného průtokoměru s přesností na 1 sekundu a funkčnost nastavení byla odzkoušena. Jednotka disponuje ethernetovou kartou pro vzdálený přístup, stahování dat i pro provádění parametrizace. Data jsou po připojení k internetu stahována a nahrávána na cloudové uložení v 10-ti minutovém intervalu. Po přihlášení je k datům přístup zajištěn přes web <https://stanice.fiedler-magr.cz/>.

Z nádrže s předčištěnou šedou vodou je voda čerpána ponorným kalovým čerpadlem přes škrtící ventil a vodoměr do mokřadní části. V první fázi experimentu od 17.6. do 18.8. 2020 bylo škrcení na ventilu nastaveno tak, aby čerpadlo s konstantním výkonem dodávalo do mokřadní části 1x denně v průběhu jedné minuty 10 l vody. Čerpání po dobu jedné minuty bylo zabezpečeno digitálním časovačem, který spínal čerpadlo každý den v 10:00 na 1 minutu. Škrcením průtoku na 10 l/min tak každý den do mokřadní části teoreticky mělo být načerpáno požadovaných 10 l.

Výše popsaný způsob dávkování závlahy šedé vody však vykazoval nepřesnosti. Objem nátoky se obvykle pohyboval mezi 7 a 11 litry a v ne zcela ojedinělých případech docházelo k úplnému výpadku závlahy. Řízení proto bylo od 18.8. nahrazeno přesnějším dávkováním pomocí měřicí ústředny Fiedler H3. V novém schématu bylo čerpadlo spouštěno v 10:00 ale jeho vypnutí bylo nastaveno tak, aby

³ Překlopný průtokoměr: <https://www.metergroup.com/environment/products/tipping-counter>

⁴ Snímač pro měření vodivosti a teploty vody: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/elektrochemicka-mereni/konduktometry/snimac-esv11>

⁵ Multikanálová záznamová a řídicí jednotka: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/telemetrick-stanice-d-c-jednotky/h7-telemetrick-stanice-pr-tokom-r-plc>

v momentě, kdy ústředna zaznamená určitou dávku na vodoměru měřícím přítok do experimentální sestavy, čerpání vypnula. Tato dávka byla několikrát upravována v intervalu od 6 do 12 l/den. Konečná denní dávka ŠV byla nastavena na 10 l/den a až na několik výpadků byla aplikována od 28.8. do zazimování experimentu 30.10.2020. Závlahová dávka byla zvolena s cílem dosáhnout každodenního měřitelného odtoku z ploch.

Do řídicího programu měřící ústředny byla vepsána ochrana běhu čerpadla nasucho, která v případě, že vodoměr na vtoku neindikuje další puls do 180 s, čerpadlo vypne bez ohledu na velikost dosud načerpané závlahové dávky.

5.2.3 Vlhkostní a teplotní čidla

Do již hotové části zelené střechy byla instalována sada vlhkostních a teplotních čidel TOMST⁶. Čidlo disponuje jedním vlhkostním čidlem a třemi teplotními čidly, z čehož dvě měří teplotu v půdním prostředí a jedno teplotu vzduchu u povrchu. Data jsou ukládána přímo v paměti zařízení.

Čidla byla instalována v 1/3 a 2/3 podélné délky části se zelenou střechou, což odpovídá poloze hlavy čidla (části čidla vyčnívající nad úroveň rozchodníkové rohože, kde se přikládá čip ro sběr dat) 65 cm a 125 cm od přepadu z mokřadní části. V části blíže mokřadnímu čištění byla instalována 3 čidla ve třech hloubkových úrovních – v úrovni minerální vaty, v substrátu a ve vrchní vrstvě vegetační rohože. Ve spodní části blíže výtoku ze zelené střechy byla instalována 2 čidla ve dvou hloubkových úrovních – ve vrstvě substrátu a ve vegetační rohoži.

Teplota dvou teploměřů v totožném prostředí je průměrována a zobrazena vždy jako jedna křivka. Stejně tak je průměrována teplota z pěti teploměřů měřících teplotu vzduchu u povrchu.

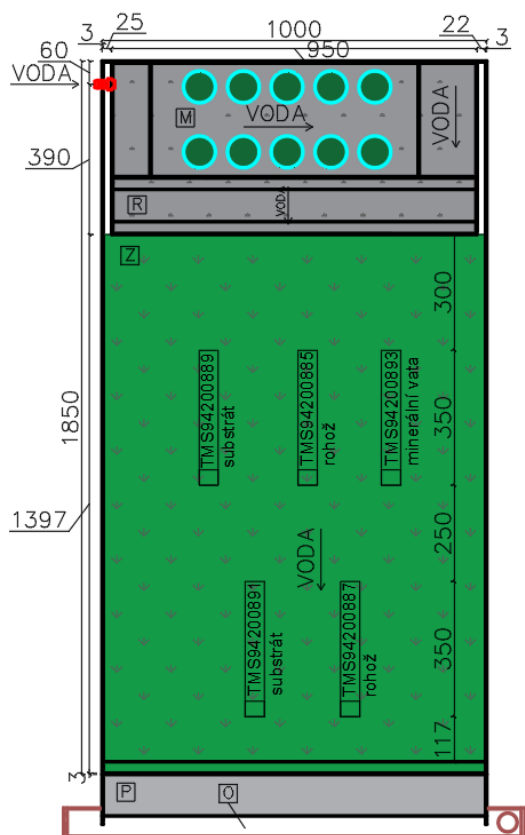


Obrázek 23: Poloha čidel a pohled na celá čidla před zapuštěním (vlevo), Poloha čidel po instalaci (vpravo)

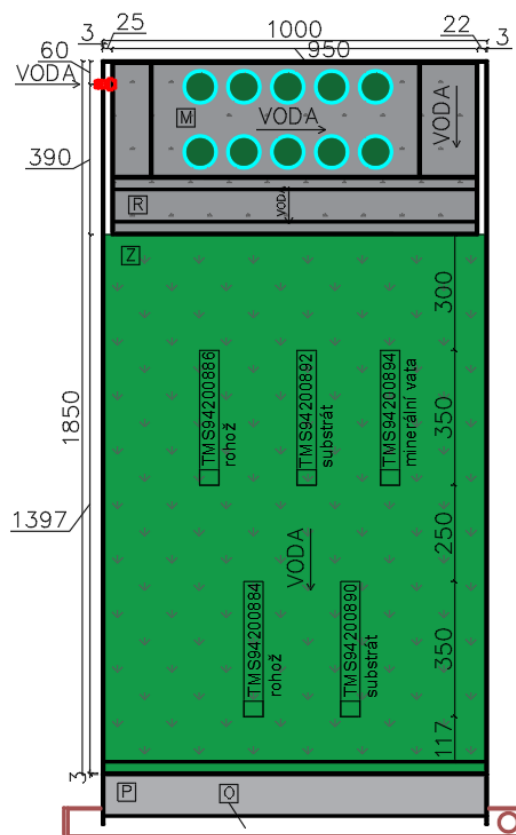
Rozmístění čidel včetně výrobního čísla, na základě kterého jsou identifikována stažená data z čidla, je zobrazeno na obrázku 24.

⁶ Vlhkostní a teplotní čidlo TOMST se 3 teplotními čidly s přesností 0,5 °C a 1 čidlem půdní vlhkosti <https://tomst.com/web/cz/systemy/tms/tms-4/>

Plocha 1 - biochar



Plocha 2 - bez biocharu



Obrázek 24: Rozmístění vlhkostních a teplotních čidel TOMST, poloha čidla je znázorněna obdélníkem v němž je vepsáno výrobní číslo čidla. Šipky znázorňují směr proudění vody v experimentu. [M] mokřadní část, [R] rozvodný žlab, [Z] zelená střecha, [P] okapový plech, [O] sběrný okap

Výstupem měření vlhkostního čidla TOMST je hodnota signálu, která nemá fyzikální význam a na výstupy je proto nutné nahlížet jako na trend vývoje vlhkosti v rámci jednotlivých měřených míst. Bez detailnější kalibrace není vhodné vlhkostní signál porovnávat navzájem mezi jednotlivými čidly.

Pro získání hodnot objemové vlhkosti je zapotřebí přepočtu s využitím kalibrační křivky. Tu je možné provést pomocí softwaru TMS Calibr Tool [73] fungujícím na rozhraní MS Excel (xlsm). Pro přepočet signálu je možné zvolit některou z předdefinovaných kalibračních křivek nebo použít vlastní zrnitostní složení a objemové hmotnosti, které je do programu možné zadat přes volbu „User soil properties“. Podrobnější informace o čidlu lze získat z článku [74].

Manuál pro TOMST datalogger uvádí, že „Using soil properties pracuje na základě databáze křivek (neobsahuje ovšem křivky pro rašelinu) a interpoluje kalibrační rovnici založenou na hustotě a podílech jílu, bahna a písku – šedé pole na řádce č. 44. Bohužel není tato databáze příliš rozsáhlá, proto doporučujeme tuto možnost využívat velice obezřetně“ [75]. Pro další zpřesnění objemové vlhkosti lze v kalibračním programu přidat konkrétně změřenou hodnotu půdní vlhkosti a výslednou křivku nechat tímto bodem proložit. Této možnosti a vlastního zadání zrnitosti a objemové hmotnosti bylo využito pro přepočet hodnot vlhkosti měřených v substrátu. Pro posun křivky do reálně změřeného bodu bylo využito vzorků odebraných pro stanovení objemové půdní vlhkosti dne 18.8.2020 v 17 hodin. Přehled laboratorně stanovených hodnot objemových vlhkostí použitých pro přepočet v substrátu je k dispozici

v *tabulce 16*. V grafech jsou pak zobrazovány měřené hodnoty s datem příštího dne, tedy od 19.8.2020. Hodnoty měření vlhkosti v rozchodníkové rohoži a minerální vatě nebyly přepočítány a v grafech jsou vyneseny jen jako hodnoty čtení čidla.

Tabulka 16: Objemové vlhkosti v substrátu experimentálních ploch P1 a P2 18.8.2020 v 17 hodin

	Objemová vlhkost
P1 Horní	0,37
P1 Spodní	0,35
P2 Spodní	0,40
P2 Horní	0,35

5.3 Výpočet evapotranspirace

Za účelem vytvoření vodní bilance na experimentálních plochách byla vypočtena potenciální evapotranspirace (ET) pomocí upravené Penman-Monteith *rovnice [3]* a pomocí Turcovy *rovnice [9]*.

Penmanova rovnice je jednou z mnoha empirických rovnic evapotranspirace. Byla vytvořena pro výpočet výparu z volné hladiny, holé půdy a trávniku [76]. Později byla rovnice upravena pro výpočet evapotranspirace z referenční plodiny představované trávnikem o výšce 12 cm a albedu 0,23 optimálně zásobené vodou [76], což se blíží našemu případu, kdy jsou plochy denně zalévány šedou vodou. Takto upravená rovnice se jmenuje **Penman-Monteith rovnice** a její řešení bývá nazýváno kombinovanou metodou výpočtu evapotranspirace, neboť při jeho výpočtu jsou současně řešeny rovnice ustáleného toku tepla a vodní páry nad povrchem (kde dochází k výparu), současně s rovnicemi energetické bilance vypařovaného povrchu [77]. Pro výpočet rovnice je zapotřebí základních meteorologických dat jako je teplota, relativní vlhkost, rychlost větru a solární radiace. Rovnici je dle [76] možné po úpravě parametrů c_n a c_d využít pro výpočet v intervalu dnů nebo hodin.

$$ET = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{c_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + c_d u_2)} \quad [3]$$

ET – evapotranspirace z referenční plochy [mm/int]

R_n – čistá radiace [MJ/(m².int)]

G – hustota tepelného toku [MJ/(m².int)]

γ – psychrometrická konstanta [kPa/°C]

T – průměrná denní teplota ve 2 m [°C]

u_2 – rychlost větru měřená ve 2 m [m/s]

e_s – tlak nasycené vodní páry [kPa]

e_a – aktuální tlak vodní páry [kPa]

Δ - sklon křivky tlaku par [kPa/°C]

c_n – konstanta pro krátké referenční plodiny dle intervalu výpočtu

c_d – konstanta pro krátké referenční plodiny dle intervalu výpočtu

Jako vstupní meteorologická data bylo využito měření meteostanice umístěné v areálu AdMaS v Brně. Data odraženého slunečního krátkovlnného záření nebyla z důvodu nefunkčnosti čidla k dispozici a veličina byla proto odvozena na základě průměrného albeda zelené střechy měřeného na UCEEBu v denních hodinách mezi 8 a 16 hodinou. Albedo zelené střechy s rozchodníkovým povrchem na UCEEBu bylo určeno z poměru dopadeného a odraženého krátkovlnného slunečního záření na hodnotu 0,21.

Čistá neboli NET radiace R_n byla vypočtena z hodnot krátkovlnného a dlouhovlnného záření dle rovnice [4] uvedené v [78], přičemž hodnoty dlouhovlnné radiace musely být před použitím korigovány kalibračním vztahem dodaným kolegy z AdMaS.

$$R_n = Short_{up} - Short_{down} + Long_{up} - Long_{down} \quad [4]$$

$Short_{up}$ – krátkovlnné dopadající

$Short_{down}$ – krátkovlnné odražené

$Long_{up}$ – dlouhovlnné dopadající

$Long_{down}$ – dlouhovlnné odražené

Hustota tepelného toku G může být vypočtena z rovnice [5] $G = 0,04 \cdot R_n$ odvozeného pro povrch se sekáným a dobře zavlažovaným trávníkem v Kalifornii [79]. Ale zde byla z důvodu velmi malých hodnot zanedbána.

Psychrometrická konstanta γ byla uvažována konstantou 0.066 [kPa/°C] získané z odborného webu [80]. Jedná se o konstantu umožňující na základě teploty vzduchu určit parciální tlak vodní páry ve vzduchu.

Teplota rosného T_d bodu potřebná pro výpočet aktuálního tlaku vodní páry e_a byla vypočtena z rovnice [6] [81], jehož vstupy jsou teplota vzduchu T a relativní vlhkost V .

$$T_d = \frac{243,5 \ln\left(\frac{V}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot T}{243,5+T}}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{V}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot T}{243,5+T}}\right)} \quad [6]$$

Aktuální tlak vodní páry byl vypočten z Clausius-Clapeyronovy rovnice [7].

$$e_a = P_{tr} e^{\left(\frac{\Delta H_{v\dot{y}p}}{R} \left(\frac{1}{T_{tr}} - \frac{1}{T_d}\right)\right)} \quad [7]$$

P_{tr} – tlak vody v trojném bodě = 611,7 Pa

$\Delta H_{v\dot{y}p}$ – molární latentní teplo výparu = 44600 J/mol

R – molární (univerzální) plynová konstanta = 8,314 J x mol/K

T_{tr} – Teplota vody při trojném bodu = 0.01 °C

Tlak nasycené vodní páry e_s byl vypočten z obdobného vzorce s tím rozdílem, že teplota rosného bodu T_d byla nahrazena aktuální teplotou měřenou ve dvou metrech T [°C].

Sklon křivky tlaku par byl vypočten z rovnice [8] uvedené v [78].

$$\Delta = \frac{4098[0,610 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}\right)}]}{(T+237,3)^2} \quad [8]$$

Průměrná hodnota denní ET byla za období 18.8.-30.10.2020 pomocí Penman-Monteith rovnice [3] vypočtena s výsledkem 1,3 mm/den. V průměru je započten čtyřdenní výpadek měření meteostanice a tedy ET rovné 0 mm. Relativně nízké hodnotě ET nahrává fakt, že průměrná rychlost větru byla v sledovaném období rovna 0,9 m/s. Dle Trucovy rovnice [9] byla průměrná denní hodnota ET ve stejném sledovaném období vypočtena se stejným výpadkem na 3,1 mm.

Turcovu rovnici [9] pro výpočet denní potenciální evapotranspirace [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$] lze použít pro výpočet na travnatých plochách za předpokladu kladných průměrných denních teplot. Výpočet evapotranspirace touto rovnicí vychází z průměrné denní teploty vzduchu T [$^{\circ}\text{C}$] a průměrné denní intenzity krátkovlnného záření Q [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})$] [82][77]. Rovnice tak problém značně zjednodušuje a dají se od ní očekávat značné nepřesnosti. Turcova rovnice pro výpočet evapotranspirace [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$] pak nabývá tvaru:

$$ET = 0,013 \frac{T}{T+15} (Q + 50) \quad [9]$$

Podobně zjednodušující pohled nabízí zjednodušená **Penmanova rovnice** pro výpočet výparu E_0 [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$] z volné vodní hladiny, kde do výpočtu vstupuje jen teplota vzduchu T , teplota rosného bodu T_d (lze vypočítat z relativní vlhkosti vzduchu viz rovnice [6], nadmořská výška h a zeměpisná šířka A [83]).

$$E_0 = \frac{\frac{700(T+0,006 \cdot h)}{(100-A)} + 15(T-T_d)}{80 \cdot T} \quad [10]$$

Pro vyčíslení evapotranspirace na experimentálních plochách byla nakonec použita kombinace Penman-Monteith rovnice evapotranspirace a zjednodušená Penmanova rovnice. První zmíněná rovnice byla v poměrné části použita při výpočtu evapotranspirace z plochy zelené střechy a Penmanova zjednodušená rovnice, dávající vyšší hodnoty evaporace (E) než rovnice pro ET, pak pro výpar z volné hladiny v mokřadní části. V srpnu se takto získané hodnoty ET činily 3,5 mm/den. Záříjový průměr klesl na 2,2 mm/den a říjnový průměr pak na 1,1 mm/den.

5.4 Optimalizace chodu experimentu

Vzhledem k tomu, že byl pro měření nátoku a odtoku použit relativně nový typ měřicí stanice Fiedler H3 s parametrizací navrženou speciálně pro tento experiment, potýkalo se měření v počátcích s několika komplikacemi pramenícími zejména z parametrizace jednotky. Navíc se vyskytla nečekaná mechanická závada na překlopném průtokoměru spočívající ve vypadnutí magnetu z překlopné odměrné vaničky. Při překlopení tak nebyly vysílány pulzy do měřicí jednotky. Závada byla odstraněna opětovným nalepením magnetu na původní pozici. Tyto nedostatky byly do 18.8.2020 odstraněny a v této práci jsou prezentována měření s pozdějším datem. I tak se během měření vyskytlo nestandardní chování.

V rozmezí 18.-19.10. a jednorázově 22.10. okolo 1:00 bylo na vodoměru na nátoku na plochu P1 naměřeno větší množství pulzů, v celkovém součtu 54 l, mimo definovanou závlahovou dávku v 10 hodin dopoledne. Jelikož na tyto pulzy nebyla registrována žádná reakce na odtoku z ploch ani na vlhkostních čidlech, pravděpodobně se jednalo o „falešné“ pulzy a jako takové byly z dat vyfiltrovány.

Druhá nesrovnalost se vyskytla při měření nátoku na plochu P1 16.10. po 10. hodině během zálivky ŠV. Na ploše P1 je na nátoku registrován první pulz v 10:02, ale odtok reaguje již 10:01. Během této události bylo zaznamenáno načerpání 6 l ŠV. Na odtoku však bylo naměřeno v následujících 30 minutách okolo 22 l. Je pravděpodobné, že vodoměr měřící nátok na plochu se zavzdušnil, pro což není konstruován a měření tak není definováno. Případně se na něm mohl vyskytnout jiný problém, který ovlivnil měření a čerpání tak probíhalo aniž by byly pulzy vodoměrem čteny a program mohl vyhodnotit závlahu jako provedenou. To způsobilo, že načerpaná voda protékla přes mokřadní část a vatou skrz plochu ZS a odtekla z experimentální sestavy pryč přes překlopný průtokoměr na výtoku. Z důvodu vyrovnání tohoto zjevného nepoměru mezi vyšším odtokem než přítokem bylo přistoupeno k umělému navýšení počtu záznamů pulzů vstupního vodoměru na ploše P1. Protože se jedná o bezprecedentní množství závlahové dávky, nebylo možné přesně určit odtokový koeficient. Nicméně z odtokových reakcí v podmínkách značně vlhkého substrátu jako tomu bylo 15.10. a 17.10., kdy odtokový součinitel v reakci na závlahu dosahoval na obou plochách přibližně 0,8, resp. 0,9, lze odvodit, že pokud 16.10. z plochy P1 v reakci na závlahu ŠV odteklo 23 l, musela se závlahová dávka pohybovat okolo 25 l. Datová řada byla tedy na tuto hodnotu pro nátok na P1 doplněna.

Obdobný problém se vyskytl i 21.10., kdy na ploše P1 podle záznamu sice sepnulo čerpadlo, ale na vodoměru měřícím nátok nebyl zaznamenán ani jeden pulz. Vodoměr na odtoku z P1 však zaznamenal významný odtok v objemu přes 12 l mezi 10:00 a 10:30. Pravděpodobně se tak zopakovala blíže nespecifikovaná závada na čerpací aparatuře na ploše P1. Za účelem doplnění datové řady byl opět záznam pro nátok na P1 uměle doplněn o 14 l v čase od 10:00.

Další nestandardní chování se projevovalo čerpáním ŠV mimo stanovený interval. Stalo se tak 7.10. v 15:54 na ploše P2 (doplněno 10 pulzů na nátoku), 8.10. v 15:20 na ploše P2 (doplněno 10 pulzů na nátoku), 9.10. v 9:09 na ploše P1 (doplněno 10 pulzů na nátoku) a 20.10. v 7:38 a 14:57 na ploše P2 (doplněno 2x 10 pulzů na nátoku). Všechny nátoky mimo časový interval od 10 do 10:30 hodin byly odfiltrovány a následně zpětně připsány jen v případě, že na ně existovala zjevná reakce čidel odtoku.

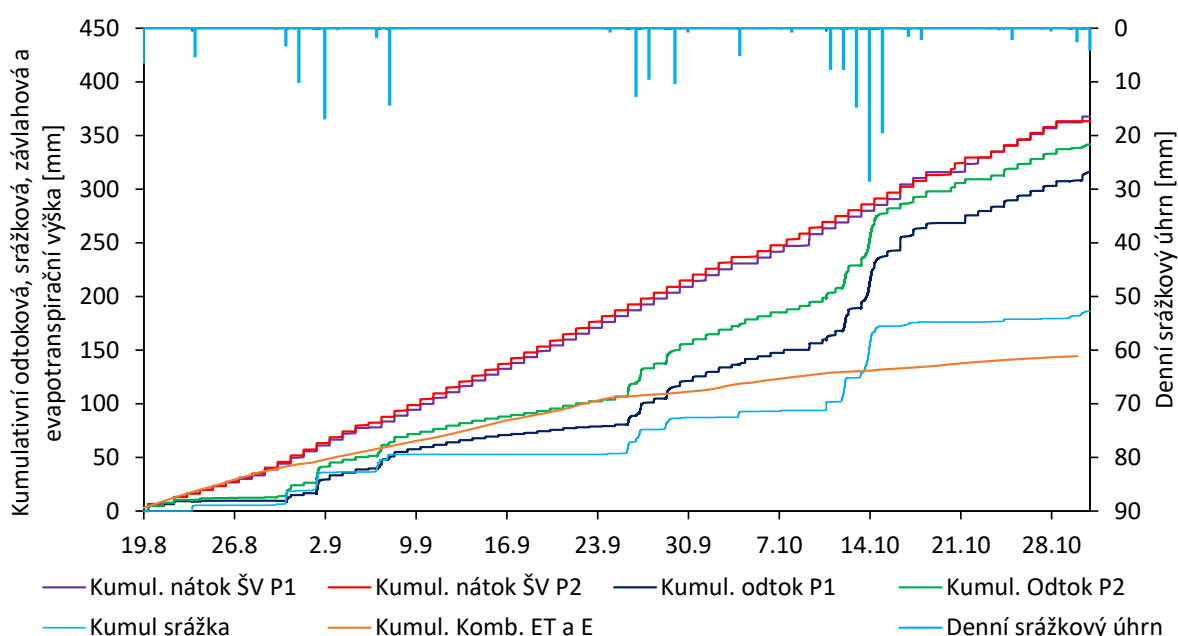
5.5 Výsledky měření na experimentálních plochách

Data prezentovaná v této kapitole pochází z experimentálních ploch osazených zařízeními pro měření závlahové dávky ŠV, měřením odtoku, teplotními a vlhkostními čidly. Plocha P1 navíc disponuje měřením konduktivity a teploty odtoku. V těsném sousedství s experimentálními plochami ZS je

umístěna meteostanice ve správě AdMaS, z níž byla využita měření meteorologických ukazatelů: teplota, relativní vlhkost vzduchu, dešťové srážky, tlak, radiace, rychlost větru.

5.5.1 Měření vodní bilance

Z obrázku 25 je patrné, že nátok ŠV na experimentální plochy se místy vlivem ne zcela bezchybného dávkování ŠV lišil a nebyl na plochách P1 a P2 stejný. To je vidět například 5.9., 8.10. či 20.10. Celkový kumulativní nátok je však v kumulativním součtu téměř stejný. Srážka dopadající na plochy je vzhledem k jejich těsnému sousedství také stejná. Co se však liší je odtok z ploch. Z kumulativního vyjádření je patrné, že z plochy P1 (s biouhlem) v celkovém součtu oteklo o 26 l vody méně než z plochy bez biouhlu a to i přes to, že, dle měření, na plochu P1 byl nátok za celé období o 4 l vyšší. Na obrázku 26 je dále zobrazena srážka v kumulativním a denním vyjádření a kumulativní kombinovaná evapotranspirace popsaná v kapitole 5.3.



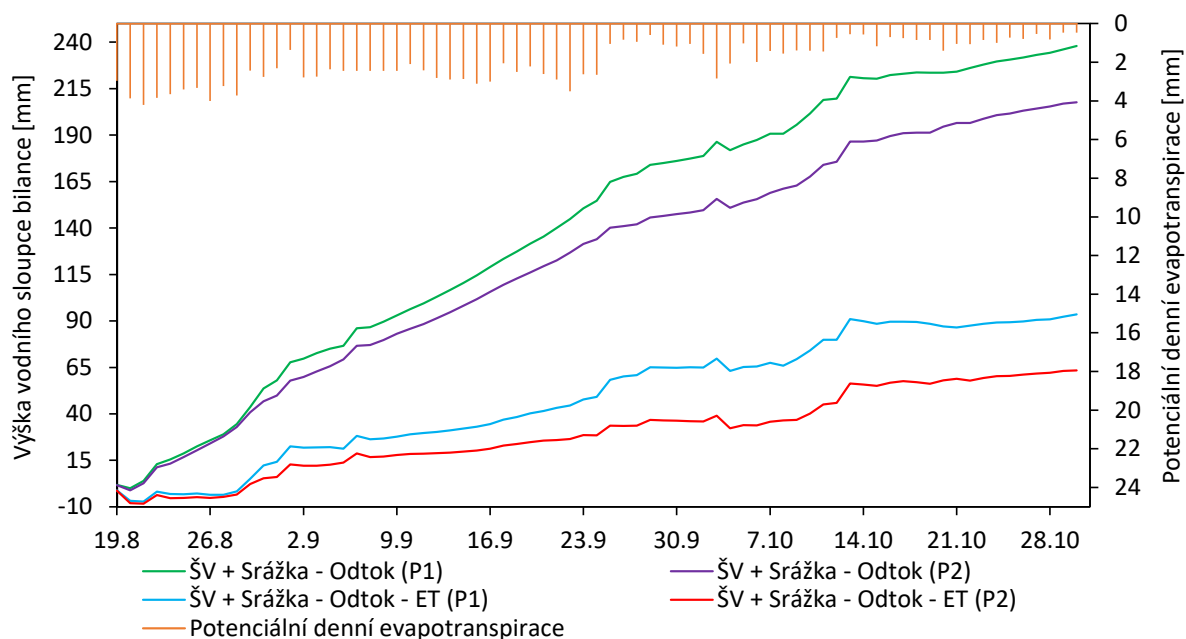
Obrázek 25: Kumulativní nátok a odtok z experimentálních ploch s denním srážkovým úhrnem a evapotranspirací dle kombinovaného výpočtu Penman-Monteith a Penman rovnice vyjádřené taktéž kumulativně

Závlahové dávky a odtok měřené v jednotkách objemu jsou přepočítávány na výšku sloupce vody v mm. Pro přepočet je použita plocha mokřadní části a plocha zelené střechy v celkové ploše 1,83 m².

V bilanci je odečítána dešťová voda dopadající na okapový žlab experimentálních ploch o ploše přibližně 0,16 m². Při celkovém srážkovém úhrn v sledovaném období činícím 186 mm to představuje přibližně 30 mm na každé z ploch. Na ploše P1 se zdánlivě v zobrazovaném časovém intervalu nakumulovalo 93 mm vody a na ploše P2 63 mm.

Na obrázku 26 jsou zobrazeny dvě vodní bilance. První bilance bez započtení evapotranspirace je počítána jako nátok ŠV plus srážkový úhrn mínus odtok z plochy. Druhá bilance vč. ET je počítána stejným způsobem s tím, že je navíc odečítána evapotranspirace získaná na základě výpočtu Penman-Monteith rovnice v kombinaci s výpočtem evaporace zjednodušenou Penmanovou rovnicí. Obě bilance jsou počítány z denních součtů. V ideálním případě, kde by všechna měření a výpočty,

zejména měření a výpočet evapotranspirace, fungovaly bezchybně s naprostou přesností, by druhá ze zmíněných vodních bilancí měla vyjadřovat zásobu vody v ploše ZS. To však neplatí a měření je zatíženo chybami, které způsobují zdánlivou kumulaci vody v experimentálních plochách.

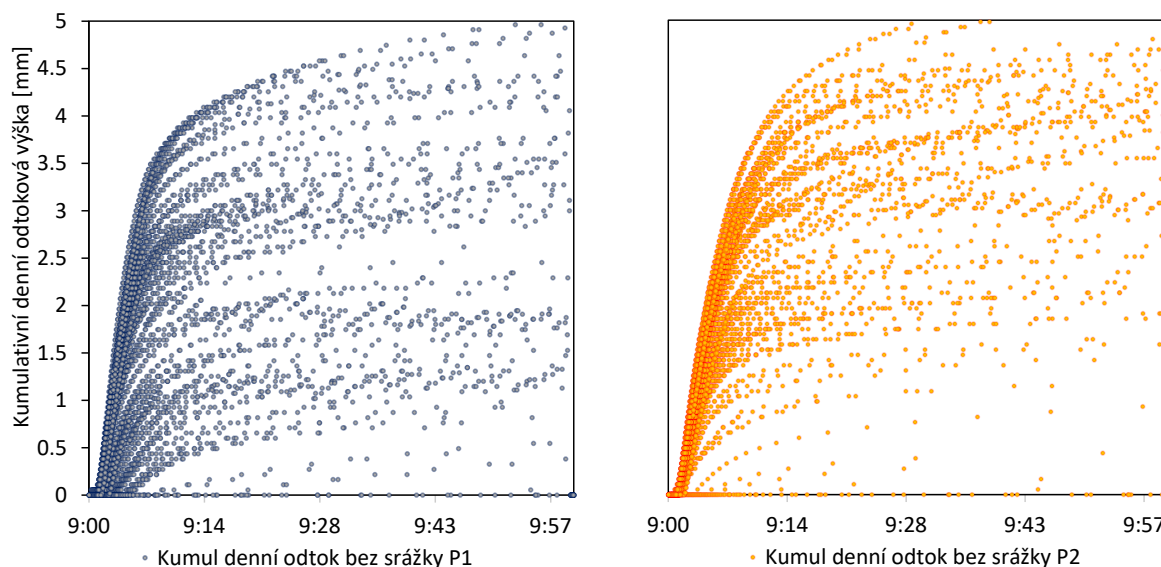


Obrázek 26: Kumulativní vodní bilance s a bez evapotranspirace a potenciální denní evapotranspirace

5.5.2 Reakce odtoku na závlahu

Pro lepší porozumění reakce odtoku z ploch na závlahu ŠV byly sestaveny grafy zobrazující odtok po dobu jedné hodiny od počátku čerpání ŠV (Obrázek 27), tedy v časovém intervalu 10 až 11 hodin. Data jsou očištěna od odlehklých hodnot a o srážkový úhrn, zaznamenaný v tomto intervalu, z důvodu snahy zobrazit čistě reakci na závlahu ŠV. Z grafů je vidět, že nejintenzivnější odtok na obou plochách probíhá od 1 až 2 minut po započítání závlahy a trvá přibližně 10 až 15 minut, přičemž s postupem času slabne.

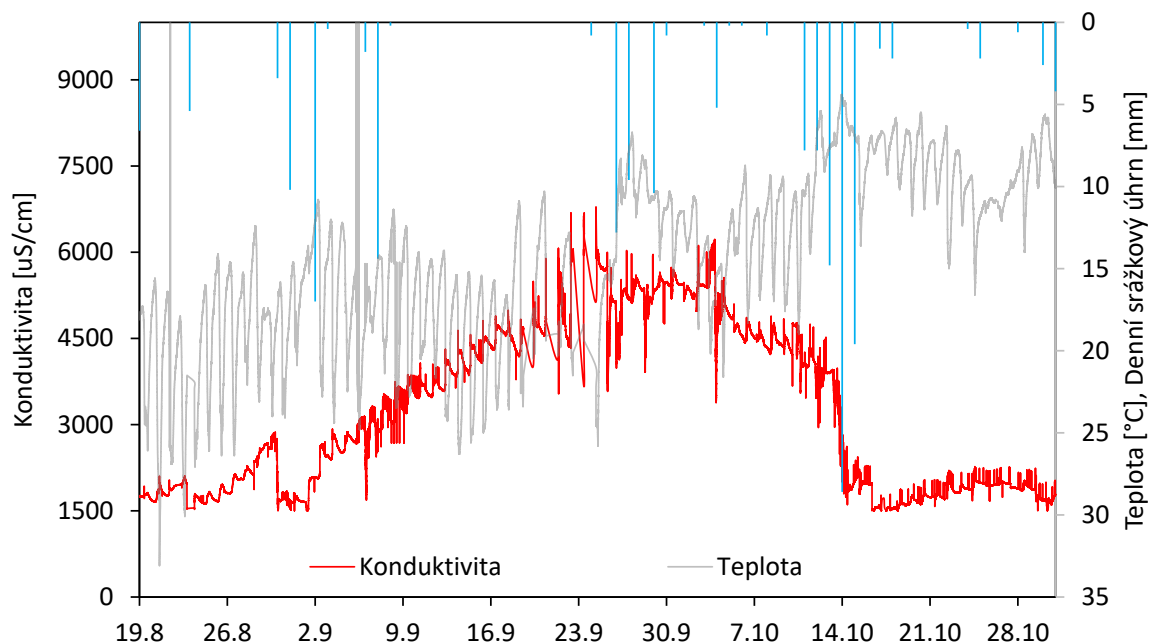
V bezdeštném období 16.9. až 23.9., jemuž navíc týden nepředcházela dešť, začíná odtok v reakci na závlahu ŠV na P1 po 3-6 minutách, trvá obvykle okolo jedné hodiny a dosahuje v průměru 1,8 l, což odpovídá přibližně 1 mm vodního sloupce a odpovídá odtokovému součiniteli 0,18. Na P2 odtok začíná dříve než na P1 a to sice už po necelých dvou minutách, trvá 50 až 80 minut a dosahuje v průměru 3,6 l, což představuje přibližně 2 mm vodního sloupce a odpovídá odtokovému součiniteli 0,36. Hodnoty dvou vysokých odtoků na ploše P1 jsou spojeny s chybami čerpacího a řídicího systému popsány v kapitole 5.4.



Obrázek 27: Kumulativní denní odtok z ploch v reakci na závlivku jednu hodinu po závlaze po odečtení srážkového úhrnu v zobrazovaném čase. Nejintenzivnější odtok nastává na obou plochách P1 (vlevo) i P2 (vpravo) mezi 2 a 15 minutou po závlaze.

5.5.3 Konduktivita odtoku

Čidlo konduktivity (umístění viz Obrázek 19) je z důvodu vysoké ceny zařízení umístěno jen na výtoku z plochy P1. Sonda je umístěna v nádobě pod výtokem z plochy a voda se tak při odtoku z plochy v nádobě postupně ředí a obměňuje. Z obrázku 28 je vidět pokles konduktivity za deštivých dní, způsobeným ředěním odtokové vody vodou srážkovou s nižším obsahem iontů. Nejlépe je tento jev pozorovatelný v první polovině října. Za bezdeštného období přibližně od 8.9. do 25.9 je vidět kontinuální růst konduktivity. V tomto období je nádobka se sondou konduktivity dotována jen odtokem způsobeným závlahou ŠV. V druhé části tohoto suššího období je patrný pokles čtení sondy do velmi nízkých hodnot blížících se nule, způsobený pravděpodobným vyschnutím nádoby s odtokovou vodou. Za účelem snížení tohoto rušení byly hodnoty nižší než 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ v datech 18.-30.9.2020 odfiltrovány.



Obrázek 28: Konduktivita a teplota vody na výtoku z plochy P1

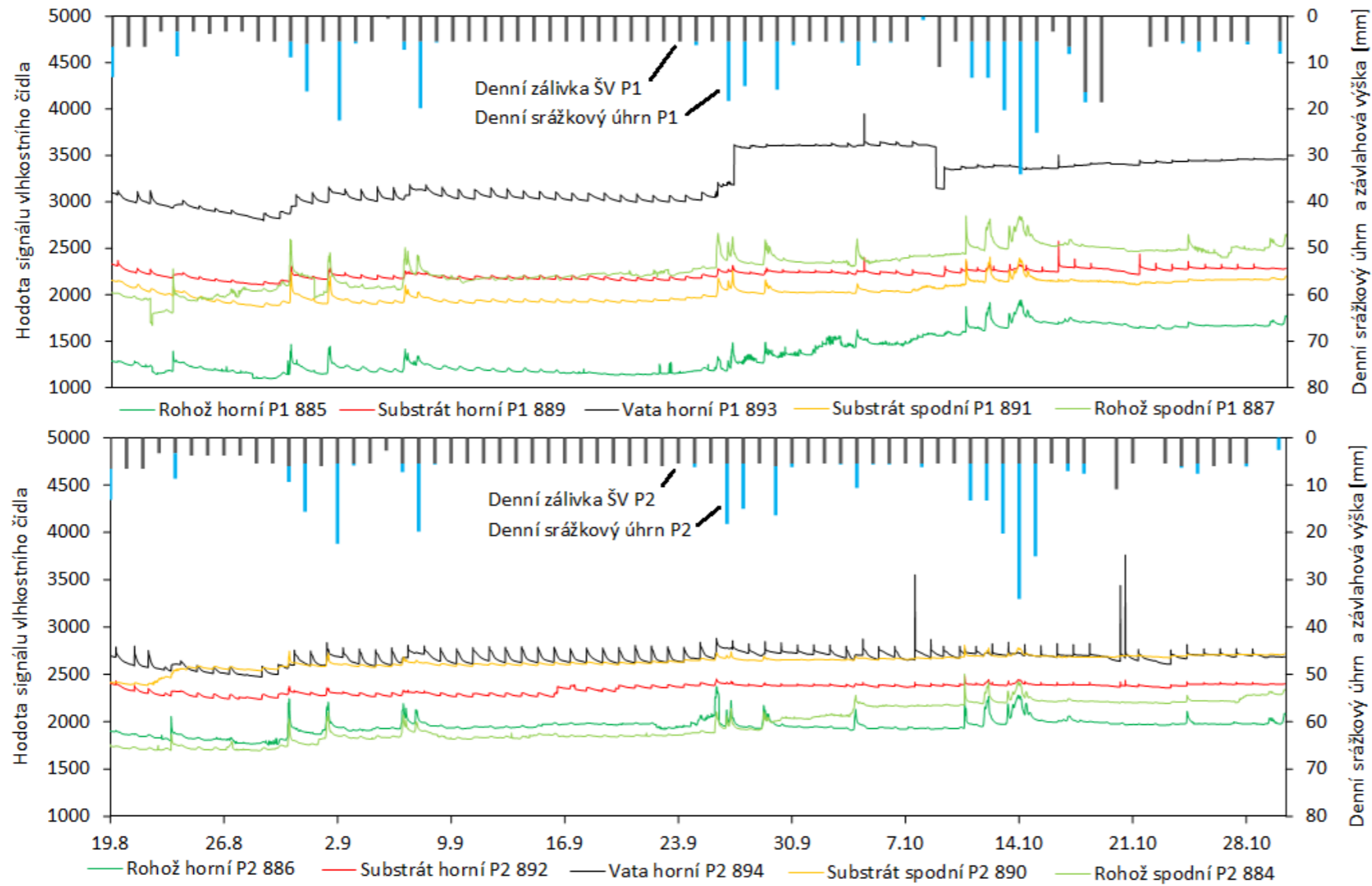
5.5.4 Měření a přepočítání vlhkosti

Na obrázku 29 je prezentována hodnota signálu TOMST vlhkového čidla. Jedná se o přímé výstupní hodnoty čidel vlhkosti. Přepočítaná objemová vlhkost substrátu je zobrazena v grafech na obrázku 30.

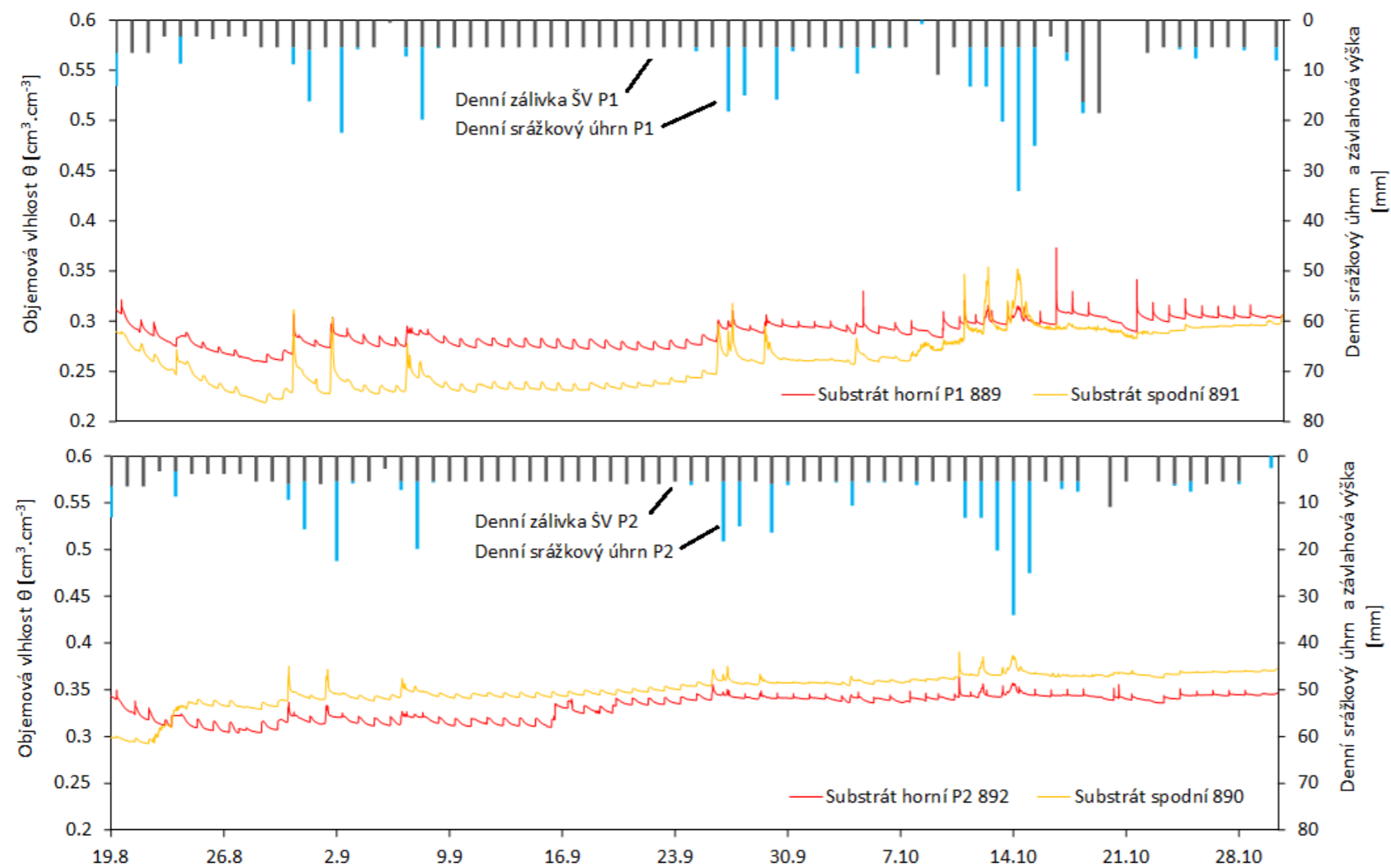
Z horní části obrázku 29 popisující průběh vlhkového signálu na ploše P1 je patrné, že nejvýraznější změnou vlhkového signálu na závlivku ŠV reaguje čidlo v minerální vatě nacházející se v spodní části souvrství. Následuje čidlo v substrátu blíže k nátoku ŠV (889). To platí pro plochu P1 i P2. Reakce vaty jako vrstvy navržené pro rozvod závlivky ŠV rovnoměrně po celé ploše ZS je v souladu s předpokladem. Po rychlém nárůstu vlhkosti závlivkou nastává poměrně výrazný pokles vlhkosti, jež se postupně zpomaluje. Z grafů zobrazujících odtok je vidět, že část závlivky ŠV nastavená na 6,5 mm pravidelně začíná odtékat do několika minut po čerpání, což naznačuje, že vata byla nasycena, voda je z ní dále redistribuována do vyšších částí souvrství a přebytek odtéká. Po rapidním nárůstu vlhkosti závlahou následuje období poměrně rychlého poklesu vlhkosti, který má zpomalující tendenci a nejpatrnější je přibližně po dobu 9 hodin po závlaze. V rozchodníkových rohožích se efekt závlivky na změnu vlhkosti příliš nezobrazuje. V rohoži umístěné v horní části souvrství je logicky patrná výrazná reakce na dešťovou srážku. Reakce je rovněž poměrně výrazná u čidla v substrátu ve spodní části plochy (891).

Na spodní části obrázku 29 popisujícím chování vlhkových čidel v ploše P2 je vidět, že čidla v hlubších částech souvrství, tedy ve vatě a v substrátu na srážku prakticky nereagují. Jen u čidla v substrátu ve spodní části plochy (890) je patrná menší reakce. Stejná čidla naopak reagují na závlivku ŠV v denních intervalech. Čidla v rohoži na srážku reagují a chování je tak v tomto ohledu na obou plochách velmi podobné.

Přepočítaná vlhkost substrátu ve spodní části plochy je u plochy P2 (Obrázek 30), až na úvodních několik dní po započatí pravidelného zavlažování 19.8., vyšší než vlhkost substrátu v horní části plochy blíže mokřadní části. Jev lze teoreticky vysvětlit počáteční vodoodpudivostí rašeliny, které se postupným zvlhčením odbourala. U plochy P1 je absolutní vlhkost horního a spodního substrátu obrácena po většinu monitorovaného období, s výjimkou intenzivních dešťů od cca 11.10. do 15.10. Na tyto hodnoty se však nelze koukat bez podezření z jejich zkreslení popsáním výš.



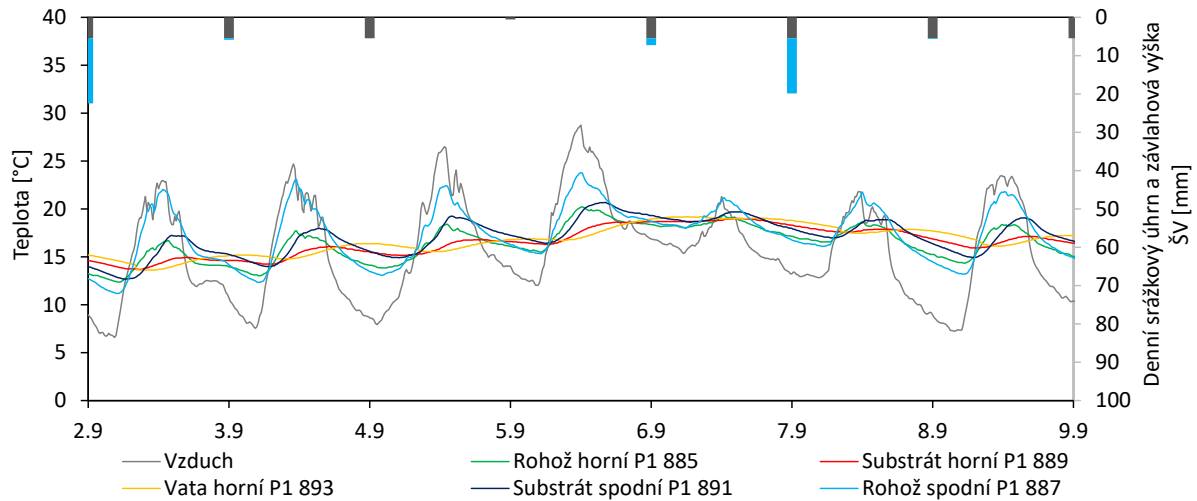
Obrázek 29: Čtení vlhkostních čidel v ploše P1 a P2. Čidla jsou identifikována konečným trojčíslím sériového čísla



Obrázek 30: Objemová vlhkost substrátu na ploše P1 a P2 a denní úhrny závlahy a srážek. Čidla jsou identifikována konečným trojčíslím sériového čísla.

5.5.5 Měření teploty

Obrázek 31 zobrazuje příklad výsledků měření teploty vrstev souvrství a vzduchu nad vegetací. Průběhy teplot pro celé období rozdělené do 14 denních úseků jsou součástí přílohy 2.



Obrázek 31: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biuuhlem) ve dnech 2.9. až 9.9.2020

Z obrázku 31 a dalších v příloze 2 je jasně vidět, že teplota vzduchu u povrchu ploch ZS osciluje dle očekávání výrazněji než teploty uvnitř souvrství. Fázový posun maximálních teplot je dle předpokladu posunut v čase po výšce souvrství. Tento trend je zřejmý ze všech měřených dat. Rozchodníkové rohože, jakožto nejsvrchnější část souvrství, dosahují maximální teploty v podobný čas jako teplota vzduchu. Maximální teplota substrátu je zpožděna oproti maximu teploty vzduchu mezi cca 10 a 16 hodinou a obvykle dosahuje maximální teploty s časem počátku poklesu maxim teplot vzduchu. Průběh teploty nejspodnější vrstvy experimentálního souvrství, kterým je minerální vata, je oproti průběhu teploty vzduchu posunut o takřka celý půl den, tedy o 12 hodin. Maximální teploty jsou ve vatě měřeny okolo půlnoci, naopak minima jsou dosahována zpravidla v dopoledních hodinách okolo 8 až 10 hodiny.

5.5.6 Vývoj vegetace na experimentálních plochách

Experimentální plochy byly fotografovány v měsíčních až dvouměsíčních intervalech. První fotografie byly pořízeny v den instalace (Obrázek 32) a poslední těsně před zazimováním (Obrázek 36). Celkem byly plochy dokumentovány pětkrát.

Obrázek 32 zobrazuje vegetaci hned po instalaci, kdy se obě vegetační rohože zdají být srovnatelné. Na snímku měsíc po instalaci (Obrázek 33) vegetace na plochách zčervenala a jsou patrná květenství. Obě plochy byly nicméně navzájem stále, co se stavu vegetace týče, bez zřejmých rozdílů.

Už ze snímku z konce srpna (Obrázek 34) se však na vegetaci projevují rozdíly. Na ploše s biouhlem je vegetace sytě zelená a působí vitálněji. Naopak na ploše bez biouhlu působí vegetace suchým dojem a zdá se, že některé rostliny odumírají. Na snímku z 30.10. (Obrázek 35) je zřejmý rozdíl v barvě vegetace. Plocha s biouhlem je stále zelená, kdežto plocha bez biouhlu se zbarvila do červena a vegetace se jeví oproti o měsíc staršímu snímku vitálněji. Na snímku z 27.11. (Obrázek 36) je pak stav velmi podobný.



Obrázek 32: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo) po instalaci (17.6.2020)



Obrázek 33: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). foto: Ing. Tomáš Chorazy, Ph.D., (16.7.2020)



Obrázek 34: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (28.8.2020)



Obrázek 35: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (30.10.2020)



Obrázek 36: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (27.11.2020)

6 Kampaň s monitoringem chemismu vody

V termínu 18.9. až 27.9.2020 bylo pracovníky centra AdMas provedeno vzorkování vody z obou experimentálních ploch zelených střech.

6.1 Metodika vzorkování

Vzorky byly odebírány na třech různých místech. A - v zásobní nádrži s šedou vodou. B - v umělém mokřadu. C - na odtoku ze zelené střechy. Na místě B a C byly vzorky odebírány vždy pravidelně v 11 hodin, tedy hodinu po závlaze šedou vodou (ŠV). Na místě C byl navíc odebrány další vzorky³ 25.9. v 9:50 před závlahou ŠV a to po dešti s úhrnem nad 6 mm dopadnuvším v čase od 6:30 do času odběru. Následně byla vyprázdněna sběrná nádoba a v 11 hod byl proveden odběr pravidelného vzorku zálivky šedou vodou. Během odběru nepršelo. V mokřadní části B bylo odebíráno jen na jedné experimentální ploše, neboť mokřadní předčištění je na obou experimentálních plochách shodné. Na místě C bylo vzorkováno pro každou ze dvou ploch samostatně. V nádrži s ŠV A, která je společná pro obě dvě plochy, byly odebrány dva vzorky 23.9. Vzorek PIN1_A představuje ŠV předčištěnou technologií Agualoop a stojí v zásobní nádrži na ŠV po několik dní. Vzorek ŠV PIN1_AA byl odebrán ze stejné nádrže po dolití „čerstvě“ upravené ŠV předčištěné technologií Aqualoop a představuje tak směs ŠV stojící v nádrži již delší dobu a ŠV relativně čerstvě čištěné. Podrobný přehled odebraných vzorků v *tabulce 17*.

Vzorky PIN1 na ploše P1¹ byly vzorkovány chlazenými vzorkovači Avalange. Vzorky PIN2 na ploše P2² byly odebírány standardním vzorkovačem ISCO a po odběru dopraveny do lednice. Všechny odebrané vzorky byly testovány stejným způsobem. Přehled testovaných chemických ukazatelů včetně nejnižší detekovatelné koncentrace přehledně v *tabulce 18*.

Tabulka 17: Přehled vzorkování experimentálních ZS AdMaS Brno

Datum	Zásobní nádrž s ŠV		ZS s obsahem biouhlu - P1 ¹			ZS bez biouhlu - P2 ²	
	Nádrž A - před doplněním ŠV	Nádrž A - po doplnění ŠV	Mokřadní část B	Odtok - odběrné místo C	Odtok - místo C po srážce	Odtok - odběrné místo C	Odtok - místo C po srážce
18.09.2020			PIN1_B1	PIN1_C1		PIN2_C1	
19.09.2020			PIN1_B2	PIN1_C2		PIN2_C2	
20.09.2020			PIN1_B3	PIN1_C3		PIN2_C3	
21.09.2020			PIN1_B4	PIN1_C4		PIN2_C4	
22.09.2020			PIN1_B5	PIN1_C5		PIN2_C5	
23.09.2020	PIN1_A	PIN1_AA	PIN1_B6	PIN1_C6		PIN2_C6	
24.09.2020			PIN1_B7	PIN1_C7		PIN2_C7	
25.09.2020			PIN1_B8	PIN1_C8		PIN2_C8	
26.09.2020			PIN1_B9	PIN1_C9	PIN1_CS ³	PIN2_C9	PIN2_CS ³
27.09.2020			PIN1_B10	PIN1_C10		PIN2_C10	

Barevně vyznačeno doplňování ŠV do zásobní nádrže A. Žlutě doplnění 60 l, zeleně doplnění 120 l.

Tabulka 18: Přehled analyzovaných chemických ukazatelů vč. nejnižší detekovatelné koncentrace

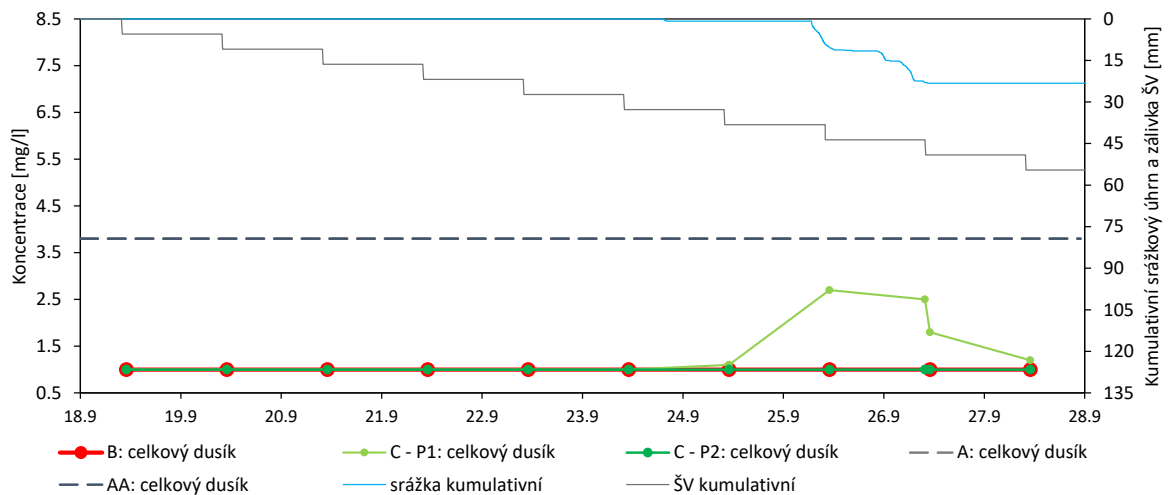
Chemický ukazatel	Jednotka	Nejnižší detekovatelná koncentrace
BSK5	mg/l	1.000
CHSK-Cr	mg/l	5.000
Dusičnanový dusík jako N-NO ₃	mg/l	0.060
NL sušené (105 °C)	mg/l	5.000
amoniakální dusík	mg/l	0.040
celkový dusík	mg/l	1.000
dusitanový dusík	mg/l	0.002
Dusitany	mg/l	0.005
dusičnanový a dusitanový dusík	mg/l	0.060
Dusičnany	mg/l	0.270
dusík dle Kjeldahla	mg/l	0.500
orthofosforečnany ⁷	mg/l	0.040
orthofosforečnany jako P	mg/l	0.010
tenzidy anionaktivní	mg/l	0.020
Barva	mgPt/l	2.000
Zákal	ZFn (NTU)	1.000

6.2 Výsledky chemických rozborů

Hodnoty celkového dusíku (*Obrázek 37*) v zásobní nádrži „A“ a „AA“ se šedou vodu (shodně 3,8 mg/l) se pohybovali výrazně nad hodnotami detekovanými jak v mokřadní části „B“ (konstantně pod či na úrovni rozpoznatelnosti 1 mg/l, na *obrázku 37* překryto tmavozelenou čarou), tak na odtoku ze experimentálních ploch ZS „C“. Zajímavá byla odezva koncentrace celkového dusíku detekovaná na výtoku z plochy P1 (s biouhlem), která po srážkových událostech rostla. Plocha P2 (bez biouhlu) na srážku z hlediska koncentrace celkového dusíku na výtoku nereagovala, nebo byla tato reakce pod rozlišovací schopností chemického rozboru činící 1 mg/l. Na ploše P1 se v bezdeštném období koncentrace celkového dusíku pohybovala pod rozlišením laboratorních analýz (1 mg/l), ale už po srážce s úhrnem 0,8 mm se koncentrace měřená na výtoku po závlaze ŠV dostala nad 1 mg/l.

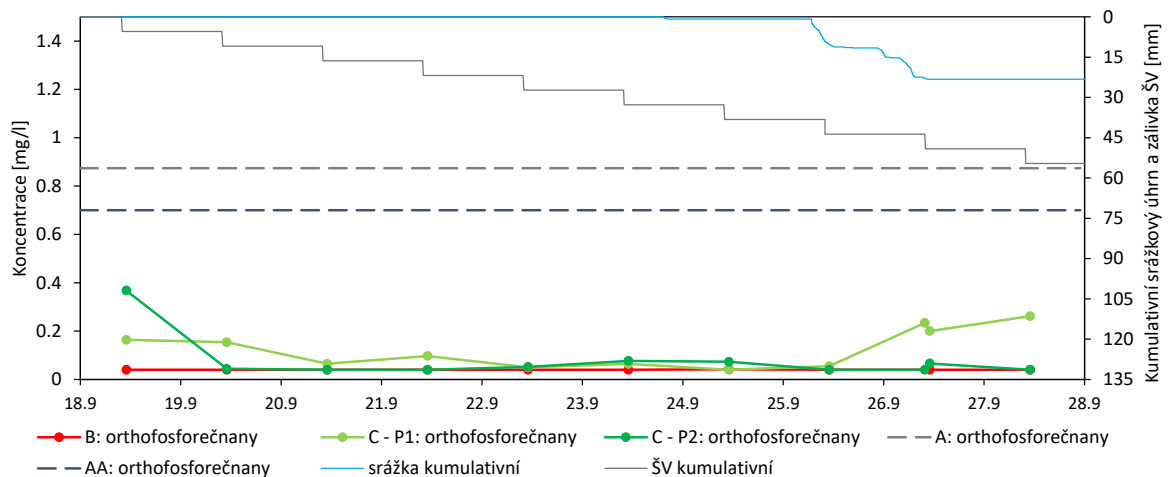
Koncentrace celkového dusíku, měřená na výtoku z P1 během deště o intenzitě přibližně 2,25 mm/hod po závlaze ŠV a po úhrnu deště 9 mm spadlého během posledních 4 hodin dne 25.9., dosáhla 2,7 mg/l. Podobná koncentrace (2,5 mg/l) byla změřena i následující den během vzorkování čistě dešťového odtoku ještě před pravidelnou závlazkou ŠV. Už o 70 minut později v 11:00 byl vzorkován odtok způsobený závlazkou ŠV probíhající pravidelně v 10:00. Koncentrace celkového dusíku v tomto odtoku byla znatelně nižší na úrovni 1,8 mg/l.

⁷ Fosforečnany jsou vázány buď organicky nebo anorganicky. Anorganicky vázané fosforečnany se mohou vyskytovat v podobě orthofosforečnanů nebo polyfosforečnanů. Orthofosforečnany představují formu fosforečnanů využitelnou rostlinami a mohou být nalézány ve splašcích. Při čištění vod mohou být přeměňovány na organicky vázané fosforečnany. Polyfosforečnany vyskytující se například v detergentech, jsou ve vodě nestabilní a mohou se měnit na orthofosforečnany [91]. Kyselost prostředí hraje klíčovou roli v dostupnosti fosforu pro rostliny. Při pH nižším než 6,8 jsou převládající formou orthofosforečnany [87].



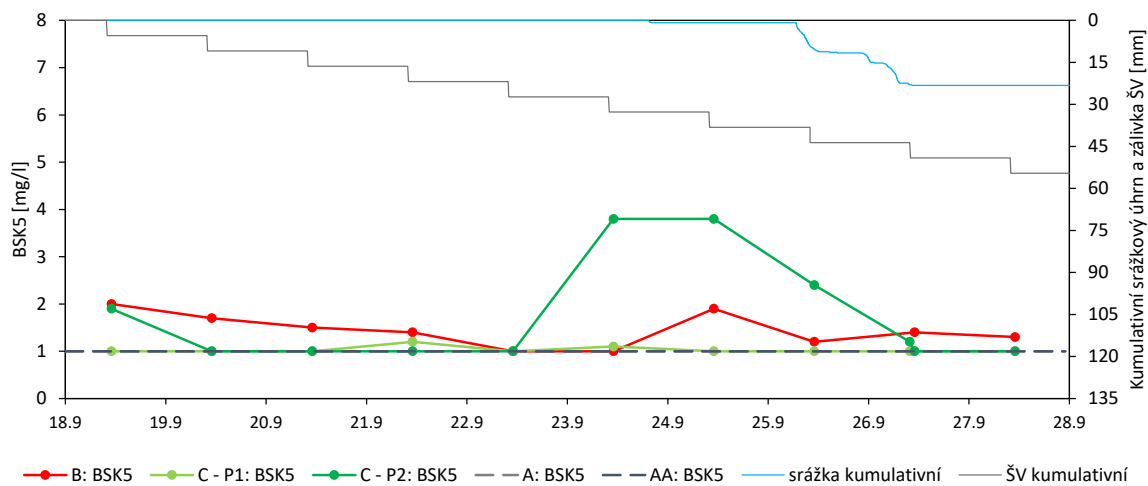
Obrázek 37: Průběh koncentrací celkového dusíku ve sledovaném období

Průběh koncentrace orthofosforečnanů (Obrázek 38), tedy anorganicky vázaného fosforu (PO_4^{3-}), má podobné rysy jako průběh koncentrace celkového dusíku. V zásobní nádrži se ŠV jsou koncentrace orthofosforečnanů výrazně vyšší než v mokřadní části a na výtoku z experimentálních ploch. Plocha P1 (s biouhlem) rovněž výrazně reaguje na srážku, během které koncentrace orthofosforečnanů na výtoku z plochy stoupají z úrovně na hranici detekce na koncentraci okolo 0,25 mg/l. Ze dvou po sobě provedených odběrech 26.9. je patrné, že dřívější odtok způsobený čistě srážkou má pro P1 vyšší koncentraci orthofosforečnanů, než jen o 70 minut pozdější odtok měřený po závlaze ŠV. Na ploše bez biouhlu P2 je tento trend opačný. Tyto rozdíly jsou však nepatrné.

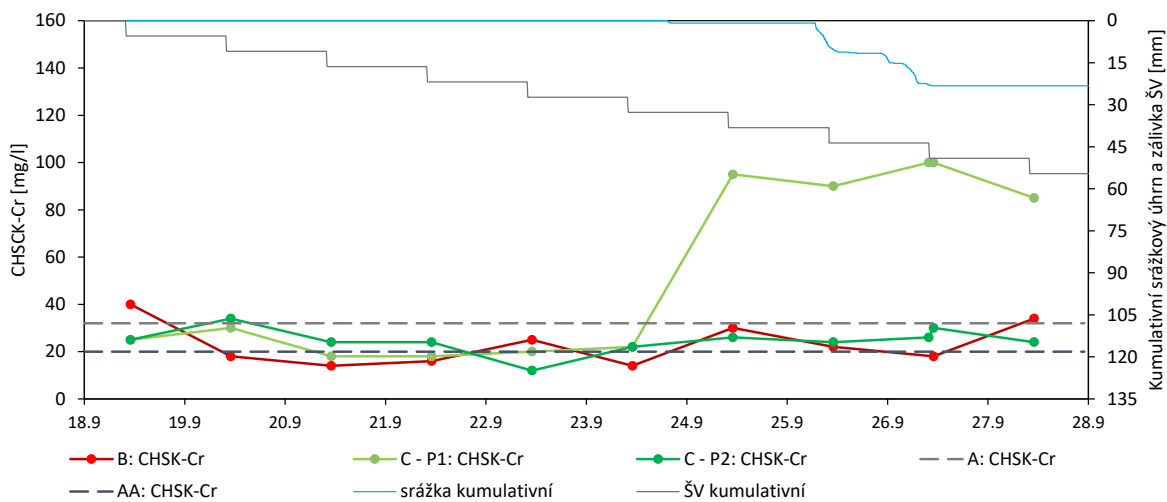


Obrázek 38: Průběh koncentrací orthofosforečnanů ve sledovaném období

Na rozdíl od nutrientů N a P jsou hodnoty BSK5 (Obrázek 39) a CHSK-Cr (Obrázek 40) v zásobní nádrži s ŠV srovnatelné s hodnotami měřenými v mokřadní části B a na výtoku z ploch zelených střech v místě C. Hodnoty BSK5 z neznámých důvodů významně rostou 23.9., což je ještě před zaznamenanou srážkou.



Obrázek 39: Průběh pětidenní biologické spotřeby kyslíku (BSK5) ve sledovaném období



Obrázek 40: Průběh chemické spotřeby kyslíku – chrom (CHSK-Cr) ve sledovaném období

7 Experimentální střecha v Třešti

Dne 22.9. 2020 byla v rámci projektu CAMEB REVOZIM ve spolupráci s firmou GreenVille service s.r.o. (Ing. Pavla Dostal) realizována experimentální zelená střecha ve městě Třešť.

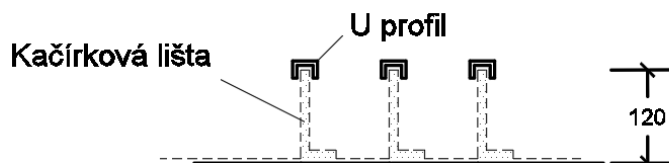
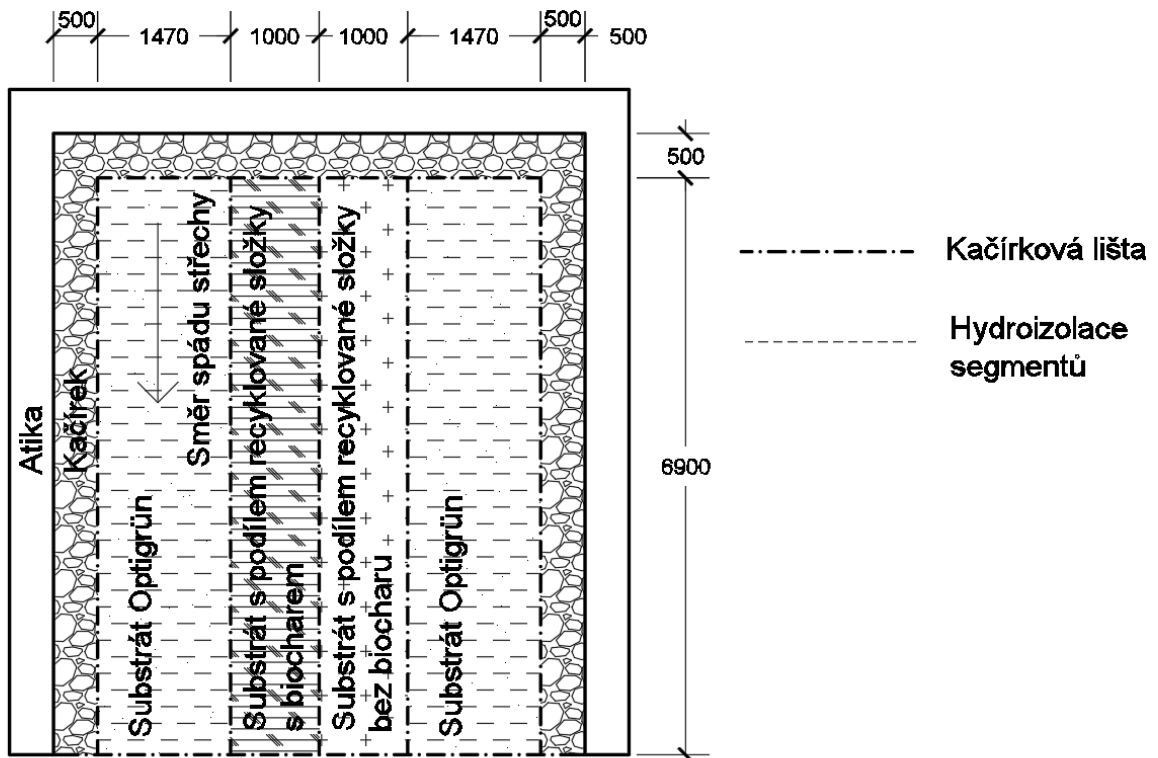


Obrázek 41: 3D pohled s vyznačením budovy pro realizaci ZS, mapy.cz

Zelená střecha byla umístěna na stávající PVC hydroizolaci budovy pokladny koupaliště Malviny – Třešť, které s tímto úmyslem již byla konstruována. Nově zbudovaná zelená střecha je členěna na 4 oddělené segmenty. Segmenty mají shodnou skladbu lišící se v použitém substrátu. Na hydroizolaci byla všude shodně umístěna ochranná geotextílie 300 g/m², na ní byly rozmístěny kačírkové lišty pro oddělení jednotlivých částí ZS, což je zobrazeno na *obrázku 42*. Za účelem hydraulického oddělení jednotlivých segmentů pro budoucí měření odtoku byla přes kačírkové lišty umístěna kořenovzdorná fólie. Ta byla opět pokryta ochrannou geotextílií a v celé ploše střech byla rozmístěna hydrofilní minerální vata Isover tl. 5 cm. Přímo na vatu byl pak kladen substrát tl. 5 cm. Na krajních dvou plochách byl použit standardní substrát Optigreen (německy Optigrün), na prostředních dvou pak experimentální substráty s podílem recyklovaných materiálů shodné s těmi použitými na experimentu v Brně. Na substrát pak byla kladena rozchodníková rohož. Podél atiky je umístěn 50 cm široký pás kačírku frakce 16/32 mm.

V celkové úhrnu byla realizována zelená střecha o ploše 43,9 m². Z této plochy zaujímají 13,8 m² dvě experimentální plochy s navrženými substráty, 20,3 m² plochy s komerčně dostupným substrátem Optigreen a 9,8 m² připadá na kačírkové obsypy.

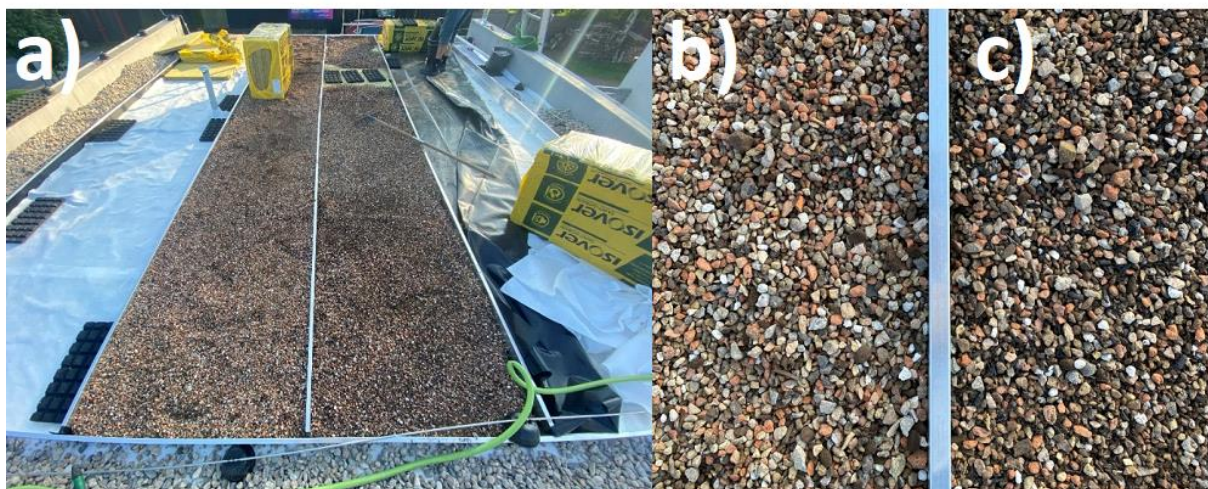
Příprava substrátů proběhla přímo na místě při realizaci. Experimentální substráty V2-5 a V2-8 byly míchány z předem dovezených materiálů (Expandovaný jíl, Drcená opuka, Stavební recyklát na bázi cihelné drti, Rašelina, Vápenný dolomit, Biouhel) ve stavební míchačce. Pro lepší míšení jednotlivých materiálů bylo vyzorováno, že je vhodnější začít do míchačky přidávat nejdříve těžší hmoty, neboť lehčí materiál jako rašelina měli tendenci ulpívat v zadní straně míchačky.



Obrázek 42: Dispozice zelené střechy



Obrázek 43: Realizace ZS Třešť – spodní vrstvy ZS (ochranná geotextílie hydroizolace, kačírkové lišty, hydroizolační kořenovzdorná fólie pro oddělení experimentálních ploch ZS, geotextílie, hydrofilní minerální vata)



Obrázek 44: a) Substráty s podílem recyklovaných materiálů po umístění na ZS (vlevo plocha T2 bez podílu biouhlu, vpravo plocha T1 s podílem biouhlu), b) Detailní pohled na substrát s podílem recyklovaných materiálů bez biouhlu, c) Detailní pohled na substrát s podílem recyklovaných materiálů s biouhlem



Obrázek 46: Pohled na hotovou ZS po 2 měsících od realizace, foto Jan Mikeš (technické služby Třešť), 23.11.2020

Z fotografie je vidět, že plocha T1 se substrátem s podílem recyklovaných materiálů a biouhly (druhá zleva) je znatelně zelenější než ostatní plochy. Rozdíl v barvě vegetace je vidět i mezi plochou T2 (třetí zleva) a ostatními plochami. Vegetace je zde zelenější než na plochách se substrátem Optigreen, ale méně zelená než plocha T1 s biocharem. Důvodem může být prosazení jiného druhu rozchodníků vlivem rozdílného substrátu, který má vliv na vodní režim i chemizmus.

8 Diskuze výsledků

V této kapitole jsou diskutovány výsledky experimentu a současně porovnávány s poznatky z rešerše.

8.1 Maximální vodní kapacita a objemová hmotnost substrátů

Obě cihelné drti prokazují schopnost zadržovat vodu, přičemž cihelná drť V1 má tuto schopnost vyšší než cihelná drť V2. Při 85 % zastoupení cihelné drti je MVK substrátu V1-2 43,0 % a substrátu V2-2 30,8 %. Určitou roli samozřejmě může hrát rozdílná MVK kompostu a rašeliny, které tvoří doplněk cihelné drti v substrátech V1-2 a V2-2. Nahrazením necelé poloviny expandovaného jíl a drcené opuky v substrátu V1-1 biouhlem, jako tomu je v substrátu V1-5 dojde ke snížení MVK substrátu V1-5 oproti substrátu V1-1 o 4,6 %. Zdá se tak, že by biouhel mohl nahradit expandovaný jíl a drcenou opuku z hlediska zadržování vody při zachování velmi podobné objemové hmotnosti. Není však testováno, zda by takový substrát zajistil životaschopnost vegetaci a jestli by výluhy nutrientů při tak vysokém zastoupení biouhlu byly přijatelné.

Nově navržené substráty se v porovnání se zavedenými produkty na trhu z hlediska MVK a objemové hmotnosti zdají být vyrovnanými konkurenty. Například substrát Optigreen [72] deklaruje MVK vyšší než 35 % a objemovou hmotnost při nasycení maximálně 1450 kg/m³. Substrát ACRE extenzivní [84] deklaruje MVK 35 až 60 % a objemovou hmotnost v nasyceném stavu maximálně 1550 kg/m³. Porovnání s mezinárodní odbornou literaturou může být zavádějící, neboť není vždy zcela jasné, jak byl parametr popisující schopnost zadržovat vodu (WHC) získán. Pro substráty popisované v rešerši [18] [19] [30] [28] [26] [29] [24] [25] [27] se obvykle pohybuje okolo 25-80 %. Pro biouhel samotný jsou udávány hodnoty WHC 230 a 266 % [19] [24]. Metodiku stanovení těchto hodnot WHC se nepodařilo dohledat a hodnoty se optikou metodiky stanovení MVK jeví jako nepřiměřeně vysoké. Jedná se tak pravděpodobně o hmotnostní vyjádření. Navíc biochar s takto vysokými hodnotami WHC byl původem z materiálů, u nichž lze předpokládat vyšší pórovitost, nižší objemovou hmotnost a menším zastoupením anorganické složky. Pro cihelnou drť byla WHC stanovena na 27 a 60 % [19] [26] [27] a opět bylo pravděpodobně použito různých metodik.

8.2 Vodní bilance na experimentálních plochách a evapotranspirace

Z počátečního ladění denní závlahové dávky ŠV, kdy v druhé polovině srpna při závlahové dávce 6 l na plochu ZS a mokřadu, přepočteno na závlahovou výšku -> 3,2 mm, nebyl zaznamenáván žádný, nebo jen velmi malý odtok v řádu desetin mm, lze usuzovat, že kombinovaná evapotranspirace z plochy ZS a mokřadu vypočtena pro srpen na průměrných 3,4 mm/den se blížila závlahové výšce. Při zvýšení závlahové dávky na 10 l na plochu 28. srpna, tj. na cca 5,5 mm, se odtok z ploch pohyboval v řádu jednotek mm. Odtok obvykle dosahoval výšky 2 až 4 mm. Vzhledem k pozorování vyšší aktivity vegetace na ploše P1 lze usuzovat na vyšší evapotranspiraci z této plochy. Výpočet evapotranspirace nicméně stav vegetace nezohledňuje, což může vysvětlovat nárůst vypočítané vodní bilance na ploše P1, tj. ploše s biouhlem a vyšší aktivitou vegetace. V této souvislosti by mohla být zmíněna i měřená vyšší průměrná vlhkost substrátu P2, která bez rozdílné evapotranspirace odporuje vodní bilanci. Znovu je ale třeba upozornit, že absolutní hodnoty vlhkostí z čidel TOMST je nutné brát s rezervou.

Substrát s biouhlem V2-8 má sice o 6,6 % nižší MVK než substrát V2-5 bez biouhlu, ale z grafu kumulativních nátoků a odtoků na obrázku 25 a z vodní bilance vyplývá, že plocha s biouhlem zadržuje vodu efektivněji. Na tomto jevu může mít podíl vodoodpudivost rašeliny, která je při sycení na MVK celodenním ponorem ve vodě překonána a MVK tak vychází jako poměrně vysoká hodnota, ale v

experimentálním provozu nemusí být vodoodpudivost srážkou ani závlahou ŠV překonána a tedy tato zádržná kapacita nemůže být využita.

8.3 Evapotranspirace

Do vodní bilance vnáší nejistotu výpadek měření meteostanice znemožňující výpočet ET ve dnech 5.- 9.9.2020, kdy mohlo vzhledem k počasí v lokalitě získaném z jiných zdrojů dojít k ET asi 2,1 mm za den a v součtu tak asi 10,5 mm. To se shoduje s průměrnou ET v 15 dnech před a po tomto období. Tento výpadek je v prezentovaném grafu vodní bilance kompenzován průměrnou hodnotou ET 2,1 mm za den. Další nepřesnosti do bilance může vnášet nepřesnost měření a dávkování ŠV, které se v několika případech projevilo a problém je podrobněji popsán v kapitole 5.4. Výpočet ET a srážkové úhrny jsou závislé na meteorologických záznamech poskytnutých centrem AdMaS. Meteostanice nebyla dle vyjádření ing. Richarda Slávika Ph.D. z VUT Brno delší dobu udržována, senzor pro měření odražené krátkovlnné radiace byl zcela mimo provoz a jeho měření bylo nahrazeno albedem (0,21) povrchu rozchodníkové ZS na střeše UCEEB. Data sice řádově odpovídají očekávaným hodnotám pro roční období, ale meteostanice se dle provozovatele nachází v kačírku, což může měření oproti ZS zkreslovat. Penman-Monteith rovince ET je odvozena pro travnatý povrch. Lze očekávat, že zavlažovaná ZS může vzhledem k zvýšené vlhkosti evapotranspirovat větší množství vody. Pro snížení této nepřesnosti je pro mokřadní část použita zjednodušená Penmanova rovnice pro výpar z otevřené hladiny, který převyšuje evapotranspirační výpar ze zelené střechy.

8.4 Vlhkost

V souladu s předpokladem jsou hodnoty signálu vlhkostních čidel ve vatě na obou plochách vyšší než signál z čidel umístěných v dalších vrstvách. To odpovídá předpokladu, že vata je, jakožto médium sloužící k rozvodu vláhy, nejvlhčí částí souvrství. Při porovnání nekalibrovaných hodnot vlhkostního signálu je však nutné k datům přistupovat s rezervou.

MVK substrátu V2-8 na ploše P1 činí 41,6 %, což je méně než MVK substrátu V2-5 na ploše P2. Tomu odpovídá vyšší průměrná objemová vlhkost substrátu na ploše P2 oproti ploše P1.

Nezodpovězenou otázkou zůstává výrazný výkyv vlhkosti u čidla ve vatě (čidlo 893) přibližně v časovém intervalu od 25.9. do 10.10 (*Obrázek 29*). Zajímavé je, že po poklesu výkyvu zůstává vlhkost vyšší a jednotlivé závlahy ŠV už nejsou v jednotlivé dny tak výrazně patrné. Nezodpovězeným jevem rovněž zůstává nárůst vlhkosti, která s postupem času neklesá, u rohože (čidlo 885) od 24.9.

8.5 Teplota

Z teplotního posunu po výšce skladby zelené střechy popsaném v kapitole 5.5.5 je zajímavý fázový posun maxima teploty po výšce skladby souvrství. V minerální vatě, jakožto nejspodnější z monitorovaných vrstev, která by v případě reálné instalace pravděpodobně ležela na hydroizolaci, je maximální teplota dosahována až okolo půlnoci. Experimentální plocha leží na polystyrenovém podstavci a lze tak předpokládat, že teplotní změny jsou propagovány zejména ze shora teplotou okolního prostředí.

Fázový posun teplot byl změřen i ve studii z kanadského Toronta [85], kde porovnávali extenzivní zelené střechy s mocností substrátu 75 - 100 mm a stejnou konstrukci střechy bez ozelenění. Všechny střechy byly zateplené. Z měření teploty v různých úrovních skladby střech a v interiéru byl rovněž patrný fázový posun maximálních teplot. Na úrovni hydroizolace došlo k posunu maximální teploty z 14

hodin u referenční střechy na 19 hodin u zelených střech, a celkově byla teplota na zelené střeše snížena. Jedná se tedy o přibližně poloviční časový posun než byl změřen v Brně. V experimentu v Brně byla však teplota měřena v minerální vatě u které lze vzhledem k jejímu nasycení vodou předpokládat jiná tepelná vodivost a tepelná kapacita než u substrátu.

V letních měsících není žádoucí uvolňování tepla z konstrukce do interiéru. Dochází pak k nežádoucímu přehřívání. Vhodného fázového posunu teplot po výšce skladby střechy lze dosáhnout návrhem vhodné tepelné izolace střechy a docílit tak toho, aby zejména v letních nočních hodinách, nedocházelo k uvolňování tepla z konstrukce do interiéru.

8.6 Stav vegetace

Po počátečním shodném stavu vegetace, během kterého rozchodníkové rohože pravděpodobně získávaly živiny z rohože samotné, je na *obrázku 34* z 30.10. velmi patrný rozdíl v barvě vegetace. Plocha s biouhlem je stále zelená, tedy bez stresových faktorů pro rostliny, ale plocha bez biouhlu se zbarvila do červena, což značí, že je rostlina ve stresu. Rozchodníky jsou ale na extrémní podmínky dobře uzpůsobeny a červená barva jejich listů, ukazující na působení stresových faktorů, nemusí znamenat pro přežití rostlinu žádný problém [86]. Vzhledem k designu experimentu se dá konstatovat, že rozdíl ve stavu vegetace je zapříčiněn rozdílným poměrem rašeliny a biouhlu. Jak bylo zjištěno, poměr těchto materiálů ovlivňuje chemizmus a vodní bilanci.

Z měření vodní bilance se zatím zdá, že i přes nižší MVK substrátu použitého na P1 je odtok z plochy P1 nižší a vody tak na ploše P1 zůstává více. Tomu by odpovídal vitálnější stav vegetace na ploše P1, nicméně suchomilné rostliny, jaké jsou na plochách vysazeny, by měly bez problému vystačit i s podstatně nižším zůstatkem, než je na ploše P2. Navíc minerální vata je na obou plochách po většinu času velmi vlhká a nedostatek vláhy tak ani a jedné z ploch nehrozí. Rozdíl ve stavu a barvě vegetace tak bude mít souvislost s úživností substrátu nebo s pH.

Antokyany, způsobující červené zbarvení, mohou být rostlinou produkovány v reakci na různé druhy stresových faktorů, od nedostatku vody, přes nadbytek UV záření, až po nedostatek nutrientů dusíku, fosforu nebo síry [87]. Vzhledem k původu biouhlu z čistírenských kalů s předpokladem vysokého obsahu dusíku a fosforu [88] by se dalo usuzovat na vyšší obsah nutrientů na ploše s biouhlem, což potvrzují i měření vyšších koncentrací nutrientů v odtoku z plochy s biouhlem.

8.7 Chemizmus substrátů – pH

Substráty V2-5 a V2-8 mají nižší nebo stejné pH jako komerční substráty např. ACRE (6,5-8,5) a Optigreen (6,0-8,5). Jejich výměnné pH se pohybuje v slabě kyselé až neutrální oblasti na úrovni 5,85 a 6,53.

8.8 Chemizmus vzorkovací kampaně

Tato podkapitola se věnuje diskuzi výsledků experimentu s monitoringem chemismu vody při měřící kampani provedené na experimentálních plochách v umístěných v areálu AdMas, VUT, Brno.

8.8.1 Chemizmus – nutrienty

Z rešerše [18] [25] vyplývá, že biouhel často snižuje vyplavování nutrientů dusíku a fosforu. V experimentu provedeném v rámci této práce se vliv biouhle na snížení vyplavovaných nutrientů

z plochy s biouhlem (P1) oproti ploše bez biouhle (P2) nepodařilo prokázat. Naopak se zdá, že biouhel původem z čistírenského kalu zvyšuje koncentraci celkového dusíku na výtoku z plochy P1.

8.8.1.1 Zvýšení koncentrace vlivem části se zelenou střechou

Vzorky odebrané v mokřadní části v místě B nepřekročily hranici rozpoznatelnosti orthofosforečnanů ani celkového dusíku. Po průchodu zelenou střechou byla tato hranice v případě orthofosforečnanů na výtoku ze zelené střechy v místě C na obou plochách P1 i P2 pravidelně překračována. V případě orthofosforečnanů tak není možné vyvodit jasný závěr o vlivu biouhlu. Vliv na zvýšení může mít i obsah hnojiva v rozhodníkových kobercích. V případě celkového dusíku byla hranice rozpoznatelnosti na výtoku z plochy překročena jen na ploše P1 a to v reakci na srážku. To má pravděpodobně souvislost s obsahem biouhlu bohatým na nutrienty v substrátu. V publikace [15] o využití biouhlu v zemědělství je uvedeno, že některé typy biouhlu mohou obsah nutrienty v odtoku dokonce zvyšovat, a to zejména pokud je biouhel původem z minerálně bohatého materiálu jako je hnůj. Lze předpokládat, že čistírenský kal obsahuje významné množství nutrienty, které se při srážce vyplavuje.

8.8.1.2 Snížení obsahu nutrienty dusíku a fosforu v mokřadní části

Nejvyšší koncentrace celkového dusíku i orthofosforečnanů byly měřeny v zásobní nádrži se ŠV a zdá se tak, že rapidní snížení koncentrací obou nutrienty se děje v mokřadní části, což potvrzuje účinnost čištění z hlediska zmíněných nutrienty dusíku a fosforu.

8.8.1.3 Porovnání obsahu nutrienty dusíku a fosforu s literaturou

Koncentrace dusíku a fosforu v dešťovém odtoku ze zelených střech s biocharem zjištěné ve studiích [18] a [19] převyšují koncentrace naměřené během vzorkování v Brně. Výsledky studie [18] ukázaly, v porovnání s rozborů provedených na vzorcích odtoku ze zelené střechy, koncentrace orthofosforečnanů PO_4^{3-} o řád vyšší. Koncentrace dusičnanů na výtoku z experimentálních ploch v Brně jsou při porovnání se studií [18] opět nižší. V Brně byla nejvyšší koncentrace dusičnanů změřena 25.9. při vzorkování po závlaze ŠV v deštivém období. Stále byla přibližně třikrát nižší než koncentrace uvedená ve studii [18].

I článek Kuoppamäki [19] uvádí koncentrace nižší. Konkrétně hovoří o 4,8 mg celkového dusíku na litr a 0,9 mg celkového fosforu na litr. To se již hodnotám z měření v Brně blíží více, stále se však jedná o vyšší hodnoty.

Průměrné koncentrace nutrienty byly během 10-ti denního vzorkování s celkem 11-ti odběry vzorků výtoku na každé z ploch stanoveny pro celkový dusík na 1,39 mg/l pro P1 a maximálně 1 mg/l pro P2. Průměrné koncentrace orthofosforečnanů byly stanoveny na 0,13 mg/l pro P1 a 0,08 mg/l pro P2. Lineární extrapolací pro celý rok byly získány hodnoty emisí nutrienty N a P z každé z ploch. Hodnoty jsou zobrazeny v *tabulce 19*. Takto získané hodnoty jsou zatíženy velkou nejistotou například kvůli nerovnoměrnosti srážek v průběhu roku, které dle dosavadního měření výluh nutrienty významně ovlivňují.

Při porovnání změřených extrapolovaných hodnot z *tabulky 19* s daty na *obrázku 3* z rešerše studie [19] jsou změřené kumulativní emise nutrienty z Brna vyšší. Výrazně vyšší je ale i odtok uměle navyšovaný závlahou ŠV, který pravděpodobně řadí koncentrace vyplavovaných nutrienty. V celkovém součtu je ale jejich vyplavené množství, i díky jejich obsahu v předčištěné šedé vodě, vyšší. Je však nutné podotknout, že v této úvaze je předpokládána rovnoměrná závlaha po celý rok, což v praxi není pravděpodobné.

Nejlépe porovnatelný ukazatel ze studie [19] na obrázku 3 by ve vztahu k měření v Brně byl celkový dusík měřený na ploše bez biocharu s předpěstovaným vegetačním pokryvem. Ve studii [19] dosahuje emise celkového dusíku 1200 mg/(m².rok). Problém však je, že v Brně měřené hodnoty pochází z hranice citlivosti analýzy a mohou tak být nižší. Pokud bychom je přesto uvažovali, tak by hodnota celkové roční emise celkového dusíku byla v Brně o 34 % vyšší. Při vyšší citlivosti analýzy bychom nejspíš došli v menším rozdílu. Rozdíl na plochách s biouhlem by byl 74 %. Porovnáváme však dva naprosto jiné druhy biouhle. Ve studii [19] biouhel pochází z březové kůry a emise nutrientů na rozdíl od biouhlu použitého při experimentu v Brně snižuje.

Vymývání nutrientů v experimentu v Brně je navíc pravděpodobně do značné míry omezeno tím, že zálivka nepromývá substrát, ale sytí minerální vatu, do které rostliny prokořeňují a vodu získávají. V případě promývání substrátu s biouhlem bohatým na nutrienty by výluh mohl být podstatě vyšší.

Tabulka 19: Změřené a odvozené hodnoty odtoku, koncentrací a emisí nutrientů N a P

	Průměrná koncentrace během vzorkování [mg/l]	Celkový odtok 18.8.-30.10. [mm/75 dní]	Průměrný odtok [l/den]	Odhad odtoku [l/(rok.m ²)]	Odtok nutrientu [mg/(rok.m ²)]
Celkový N P1	1,39	347	8,33	1689	2314
Celkový N P2	<1,00	373	8,95	1815	<1815
PO ₄ ³⁻ P1	0,126	347	8,33	1689	213
PO ₄ ³⁻ P2	0,08	373	8,95	1815	145

8.8.2 Chemizmus – CHSK-Cr, BSK5

Hodnoty BSK5 a CHSK-Cr v zásobní nádrži s ŠV jsou srovnatelné s hodnotami měřenými v mokřadní části B a na výtoku z ploch v místě C. To lze vysvětlit fungujícím předčištěním ŠV systémem AQUALOOP, v němž je znečištění za pomoci aerace odbouráváno a dále již není snižováno.

Hodnoty chemické spotřeby kyslíku se povětšinou na výtoku z obou ploch pohybovaly okolo 10 až 40 mg/l. Od vzorkování provedeného 23.9. na ploše s biouhlem významně narostly na 90 až 100 mg/l, což odpovídá hodnotám z článku [25] udávající CHSK-Cr na ploše s biouhlem 97 mg/l. To by značilo vymývání oxidovatelných látek z biouhle. Systém reagoval na srážku o celkovém denním úhrnu jen 0,8 mm, jež vyvolala odtok 0,1 mm na obou plochách.

Typické hodnoty CHSK-Cr neseparované šedé vody se dle dizertační práce [89] pohybují v rozmezí 495-623 mg/l, což je výrazně více než hodnoty zjištěné pro předčištěnou šedou vodu použitou v experimentu v Brně. Pokud bychom vzhledem k převládajícímu původu ŠV použité v experimentu v Brně porovnávali jen s hodnotami ŠV z koupelen, stále se pohybujeme pod spodní hranicí uvedené v tabulce 20. To je samozřejmě dáno faktem, že ŠV je před použitím v Brně čištěna.

Hodnoty BSK5 z neznámých důvodů významně rostou 23.9., což je ještě před zaznamenanou srážkou 24.9. a dostávají se až na hodnotu 4 mg/l

Tabulka 20: Chemicko-fyzikální vlastnosti šedých vod, převzato z [89] (upraveno)

Ukazatel	Měrná jednotka	Pračky	Koupelny	Kuchyně	Neseparovaná šedá voda
pH	-	9,3 – 10,0	5,0 – 8,6	6,3 – 7,4	6,1 – 8,4
Teplota	°C	28 – 32	18 – 38	-	-
Barva	Pt·C ⁻¹	50 – 70	60 – 100	-	-
Zákal	NTU	14 – 296	20 – 370	-	-
Plovoucí látky	mg/l	79 – 280	7 – 120	134 – 1 300	-
NL	mg/l	-	-	-	45 – 330
BSK5	mg/l	48 – 682	19 – 200	669 – 756	41 – 194
CHSK-Cr	mg/l	375	64 – 8 000	26 – 1 600	495 – 623

9 Doporučení pro pokračování experimentů

V závěru roku 2020, zejména v druhé polovině měsíce října, se několikrát vyskytl nedostatek vody v zásobní nádrži ŠV, což byla pravděpodobná příčina části nestandardního chování systému. Vodoměr regulující závlahu ŠV je dimenzován na měření v zcela zatopeném stavu a v případě zavzdušnění není jeho chování definováno. Do řídicího programu sice byla v průběhu experimentu dopsána podmínka vypínající čerpadlo v případě nezaznamenání pulzu v krátkém časovém intervalu po zapnutí čerpání, nicméně se jedná spíše o ochranu čerpadla před chodem na prázdno a není jisté, že v případě čerpání zbytků vody se vzduchem nejsou zaznamenávány pulzy, které drží čerpadlo alespoň po nějakou dobu v chodu a měření nátoků nezakreslují. Udržování permanentní zásoby ŠV v nádrži by tento problém měl být eliminován. Doporučuji instalovat senzor výšky hladiny v zásobní nádrži a jeho pomocí hlídat dostatek ŠV.

Doporučuji instalaci zpětné klapky na přívodní potrubí za čerpadlo umístěné v nádrži s ŠV. Dle vyjádření dodavatele vodoměru (*enmbra.cz*) je sice pulzní čítač na vodoměru vybaven zpětným čítáním až 250-ti pulzů (jeden pulz / litr), takže pokles hladiny v potrubí mezi nátokem na experimentální plochu a vodoměr by neměl při příštím čerpání způsobovat menší nátok na plochu na úkor zpětného zaplnění potrubí, ale v případě nedostatku vody v zásobní nádrži může vnikat do hadice vzduch, který může být po opětovném čerpání vody vytlačován společně s vodou směrem k vodoměru, tím ho zavzdušňovat a zkreslovat měření. Instalace zpětné klapky by měla zajistit setrvání vody v potrubí i v případě nedostatku vody v nádrži a současně eliminovat zpětné čítání vodoměru.

Pro zpřesnění vodní bilance by bylo vhodné zastřešit odtokový žlab, na který při dosavadním průběhu experimentu dopadala dešťová voda způsobující zdánlivě vyšší odtok z ploch. Rovněž by bylo dobré ověřit stav meteostanice, jejíž data jsou používána pro výpočet evapotranspirace a odstranit případné nedostatky. Experimentální ověření výpočtu evaporace a evapotranspirace rovněž může přispět k zpřesnění celkové vodní bilance. To by například umožnilo přesněji definovat maximální možnou závlahovou dávku za účelem maximalizace využití ŠV pro ochlazování.

V měření vodoměru na nátoků se v ojedinělých případech vyskytují pulzy mimo závlahové intervaly, které ale zjevně neznamenají přítok vody do systému. Původ těchto pulzů není znám. Jejich odhalení by mohlo vést k dalšímu zpřesnění systému a zejména zjednodušit zpracování naměřených dat.

Zdá se, že CHSK-Cr se na ploše s biocharem zvyšuje v reakci na velmi malou srážku, což by značilo vymývání oxidovatelných látek z biouhlu. Srážka je však velmi malá a bylo by tak vhodné vzorkování zopakovat pro potvrzení této teorie. Srážka a jí způsobené vyplavování nutrientů ze substrátu pravděpodobně zvyšují jejich obsah v odtokové vodě. Pro potvrzení této teorie by bylo zajímavé znát podrobnější charakteristiku použitého biouhlu a charakteristiky jeho výluhu. Hodnoty BSK se navíc zvyšují ještě před počátkem srážky bez známé příčiny.

Důvodem pokračování experimentu je, kromě zpřesnění dosavadních výstupů, i dlouhodobý monitoring stavu vegetace. Až dlouhodobý monitoring může prokázat dlouhodobou životaschopnost konceptu. Existuje předpoklad, že rozchodníkové rohože dokáží po nějakou dobu žít ze zásoby živin v rohoži samotné. Víceletý experimentální monitoring navíc není příliš častý a pozorování dlouhodobé změny chování systému by proto bylo přínosné. Z dlouhodobého hlediska by bylo vhodné sledovat i cihelný recyklát, u něhož může hrozit rozpad na jemnější prachové a jílové částice a tím pádem změna charakteru substrátu doprovázená snížením hydraulické vodivosti [90]. Vliv zmrazovacích cyklů je v současnosti na UCEEBU zjišťován, ale v době odevzdání této práce ještě nebyly výsledky známy.

10 Závěr

V rámci diplomové práce byl zprovozněn experiment na malých plochách mokřadně-extenzivních zelených střech. Vegetace na obou plochách je po první vegetační sezóně v dobré kondici s patrnými vizuálními rozdíly naznačujícími vyšší dostupnost nutrientů na ploše s biouhlem. Denní zavlažování šedou vodou se na vegetaci negativně neprojevovalo.

Mokřadní zóna efektivně odstraňuje celkový dusík a orthofosforečnaný z předčištěné šedé vody. Hodnoty CHSK a BSK5 nejsou mokřadní částí pozměněny. Voda není průtokem přes minerální vatu o nutrienty dusíku a fosforu obohacena, ale plocha se substrátem obohacným o biouhel uvolňuje do odtoku větší množství celkového dusíku v reakci na srážku než plocha bez biouhlu. Koncentrace dusíku a orthofosforečnanů v odtoku z ploch je v porovnání s emisemi nutrientů zjištěnými na základě rešetře nízká. Jejich celkové kumulativní emise mohou být však relativně vyšší. Zvolený způsob závlahy, se osvědčil. V případě skrápění ploch shora by docházelo k vyššímu vyplavování nutrientů.

Měření vodní bilance ukazuje, že z plochy s biouhlem odtéká méně vody. To je pravděpodobně důsledkem vyšší evapotranspirace zapříčiněné vyšší aktivitou vegetace v důsledku lepší dostupnosti nutrientů dodaných v biouhlu.

Nejvýraznější změnou vlhkostního signálu na zálivku ŠV reaguje čidlo v minerální vatě. Omezeně reagují i čidla v substrátu. A prakticky nereagují čidla ve vegetační rohoži. Reakce na srážku je k tomuto pro vlhkostní čidla inverzní. Stejný trend je patrný na obou plochách.

Maximální teploty ve spodní části experimentálního souvrství, tedy v minerální vatě, jsou měřeny okolo půlnoci a oproti teplotě vzduchu jsou posunuty přibližně o 12 hodin. Minima jsou v minerální vatě dosahována zpravidla okolo 8 až 10 hodiny dopoledne.

Navržený substrát s biouhlem V2-8 se z hlediska objemové hmotnosti pohybuje na horní hranici lehkých komerčních substrátů a současně je lehčí než jejich těžké varianty. Jeho MVK je s komerčními substráty srovnatelná. Současně je spíše kyselější.

Dosavadní průběhu experimentu naznačuje, že koncept mokřadně-extenzivní zelené střechy se substrátem s podílem recyklovaných materiálů zavlažovaný předčištěnou šedou vodou je funkční.

11 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Přehled vybraných studií použití cihelné drti a biouhlí pro substrát zelené střechy</i>	16
<i>Tabulka 2: Vliv aplikace 7 obj. % biouhlí na množství vyplavovaných nutrientů [18]</i>	19
<i>Tabulka 3: Zrnitostní složení cihelné drti použité v [19]</i>	20
<i>Tabulka 4: Přehled složení a vlastností biouhlů použitých v zemědělství v Austrálii [15]</i>	22
<i>Tabulka 5: Vliv příměsí biouhlu na procentuální snížení vyplavovaných nutrientů P, N [%] ze substrátů a půdy</i>	23
<i>Tabulka 6: Limity bakteriální kontaminace ŠV dle anglické normy BS 8525-2:2011, převzato z [54]...</i>	27
<i>Tabulka 7: Limity znečištění surové a vyčištěné ŠV dle americké normy NSF 350, převzato z [54].....</i>	28
<i>Tabulka 8: Procentuální objemové zastoupení jednotlivých materiálů v 8 variantách střešního substrátu V1</i>	29
<i>Tabulka 9: Procentuální objemové zastoupení jednotlivých materiálů v 8 variantách střešního substrátu V2</i>	29
<i>Tabulka 10: Objemové hmotnosti použitých materiálů V1 a V2</i>	31
<i>Tabulka 11: Objemová hmotnost a MVK substrát V1</i>	33
<i>Tabulka 12: Objemová hmotnost a MVK substrátů V2</i>	33
<i>Tabulka 13: Měřené hodnoty pH a konduktivity půdního výluhu substrátů č. 8 a 5 V2</i>	34
<i>Tabulka 14: Porovnání navrženého substrátu s biouhlem s komerčně dostupnými substráty</i>	39
<i>Tabulka 15: Přehled osazených rostlin mokřadní části experimentálních ploch</i>	47
<i>Tabulka 16: Objemové vlhkosti v substrátu experimentálních ploch P1 a P2 18.8.2020 v 17 hodin</i>	50
<i>Tabulka 17: Přehled vzorkování experimentálních ZS AdMaS</i>	63
<i>Tabulka 18: Přehled analyzovaných chemických ukazatelů vč. nejnižší detekovatelné koncentrace</i> ...	64
<i>Tabulka 19: Změřené a odvozené hodnoty odtoku, koncentrací a emisí nutrientů N a P</i>	75
<i>Tabulka 20: Chemicko-Fyzikální vlastnosti šedých vod, převzato z [88] (upraveno)</i>	75

12 Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost WHC na obj. zastoupení biouhlu v substrátu dle experimentu Cao a kol. [24]	18
Obrázek 2: Skladba experimentálních segmentů zelených střech [19]	20
Obrázek 3: Průměrné roční úhrny vyplavovaných nutrientů N a P z experimentálních ploch zelených střech na m ² , převzato z [19] (upraveno)	21
Obrázek 4: Výluh P ze zemědělské půdy při válcovém experimentu v závislosti na přidání biouhlu a hnoje, převzato z [40], (upraveno)	22
Obrázek 5: Vzorky materiálů použitých pro přípravu substrátů po zhutnění za účelem měření objemové hmotnosti.....	32
Obrázek 6: Perforované dno nádoby na měření MVK, zhutňování vzorku Proctorovým kladivem, měření výšky vzorku po zhutnění (zleva).....	32
Obrázek 7: Čára zrnitosti plochy P1 (s biouhlem) a P2 (bez biouhlu)	34
Obrázek 8: Sestava pro hutnění vzorku na měření retenční čáry	35
Obrázek 9: a gravitační podtlakový aparát.....	35
Obrázek 10: Přetlakový aparát.....	36
Obrázek 11: vzorky substrátů na keramické desce pro měření retenčních čar	36
Obrázek 12: Retenční čáry pro substráty 1 V1 a 2 V1	37
Obrázek 13: Retenční čáry pro substráty 3 V1 a 4 V1	37
Obrázek 14: Retenční čáry pro substráty 5 V1 a 6 V1	38
Obrázek 15: Retenční čáry pro substráty 7 V1 a 8 V1	38
Obrázek 16: Nerezová vana po dodání (vlevo); Nerezová vana po osazení okapovými žlaby (vpravo) 43	
Obrázek 17: Detail sestavy pro sběr a měření odtoku z experimentální sestavy	44
Obrázek 18: Příprava substrátu, homogenizace směsi (vlevo); Navažování materiálu pro přípravu substrátu (uprostřed); Úprava velikosti vegetační rohože (vpravo).....	45
Obrázek 19: Celkový pohled na experimentální sestavu po instalaci 17.6.2020 s popisem zařízení	45
Obrázek 20: Podélný řez experimentální sestavou, (upraveno z diplomové práce Jana Pipty, 2020)...	46
Obrázek 21: Umělý mokřad v průběhu instalace	47
Obrázek 22: Předpřipravená aparatura pro čerpání předčištěné šedé vody do mokřadní části experimentální sestavy před instalací	48
Obrázek 23: Poloha čidel a pohled na celá čidla před zapuštěním (vlevo), Poloha čidel po instalaci (vpravo)	49
Obrázek 24: Rozmístění vlhkostních a teplotních čidel TOMST, těžiště kódu čidla udává jeho polohu. Šipky znázorňují směr proudění vody v experimentu. [M] mokřadní část, [R] rozvodný žlab, [Z] zelená střecha, [P] okapový plech, [O] sběrný okap	50

<i>Obrázek 25: Kumulativní nátok a odtok z experimentálních ploch s denním srážkovým úhrnem a evapotranspirací dle kombinovaného výpočtu Penman-Monteith a Penman rovnice vyjádřené taktéž kumulativně.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 26: Kumulativní vodní bilance s a bez evapotranspirace a potenciální denní evapotranspirace</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 27: Kumulativní denní odtok z ploch v reakci na závlivku jednu hodinu po závlaze po odečtení srážkového úhrnu v zobrazovaném čase. Nejintenzivnější odtok nastává na obou plochách P1 (vlevo) i P2 (vpravo) mezi 2 a 15 minutou po závlaze.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 28: Konduktivita a teplota vody na výtoku z plochy P1.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 29: Čtení vlhkostních čidel v ploše P1 a P2. Čidla jsou identifikována konečným trojčíslím sériového čísla</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 30: Objemová vlhkost substrátu na ploše P1 a P2 a denní úhrny závlahy a srážek. Čidla jsou identifikována konečným trojčíslím sériového čísla.</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 31: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 2.9. až 9.9.2020.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 32: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo) po instalaci (17.6.2020).....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 33: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). foto: Ing. Tomáš Chorazy, Ph.D., (16.7.2020)</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 34: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (28.8.2020)</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 35: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (30.10.2020)</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 36: Stav vegetace na plochách P1 (vlevo) a P2 (vpravo). Foto: Bc. Michal Novotný (27.11.2020)</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 37: Průběh koncentrací celkového dusíku ve sledovaném období.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 38: Průběh koncentrací orthofosforečnanů ve sledovaném období.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 39: Průběh pětidenní biologické spotřeby kyslíku (BSK5) ve sledovaném období.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 40: Průběh chemické spotřeby kyslíku – chrom (CHSK-Cr) ve sledovaném období.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 41: 3D pohled s vyznačením budovy pro realizaci ZS, mapy.cz.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 42: Dispozice zelené střechy.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 43: Realizace ZS Třešť – spodní vrstvy ZS (ochranná geotextílie hydroizolace, kačírkové lišty, hydroizolační kořenovzdorná fólie pro oddělení experimentálních ploch ZS, geotextílie, hydrofilní minerální vata)</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 44: a) Substráty s podílem recyklovaných materiálů po umístění na ZS (vlevo plocha T2 bez podílu biouhlu, vpravo plocha T1 s podílem biouhlu), b) Detailní pohled na substrát s podílem recyklovaných materiálů bez biouhlu, c) Detailní pohled na substrát s podílem recyklovaných materiálů s biouhlem.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 46: Pohled na hotovou ZS po 2 měsících od realizace, foto Jan Mikeš (technické služby Třešť), 23.11.2020.....</i>	<i>68</i>

<i>Obrázek 47: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 19.8. až 2.9.2020.....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 49: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 2.9. až 30.9.2020.....</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 51: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 30.9. až 30.10.2020.....</i>	<i>91</i>
<i>Obrázek 52: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 19.8. až 2.9.2020.....</i>	<i>92</i>
<i>Obrázek 54: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 2.9. až 30.9.2020.....</i>	<i>93</i>
<i>Obrázek 56: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 30.9. až 30.10.2020.....</i>	<i>94</i>

13 Seznam literatury

- [1] R. Feitosa & S. Wilkinson, „Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit", *Building and Environment*, vydání 140, s. 11–22, 2018.
- [2] G. Minke, *Zelené střechy: plánování, realizace, příklady z praxe*, 1. české v. Ostrava: ISBN: 8086167178, 2001.
- [3] H. F. Castleton, V. Stovin, S. B. M. Beck, & J. B. Davison, „Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit", *Energy and Buildings*, vydání 42, s. 1582–1591, 2010.
- [4] S. Pradhan, S. G. Al-Ghamdi, & H. R. Mackey, „Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges", *Science of the Total Environment*, vydání 652, s. 330–344, 2019.
- [5] V. Prodanovic, B. Hatt, D. McCarthy, K. Zhang, & A. Deletic, „Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal", *Ecological Engineering*, vydání 102, s. 625–635, kvě. 2017.
- [6] „European Commission - Environment - Waste". [Online]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>. [Ke dni: 16-bře-2020].
- [7] „The Circular Economy In Detail". [Online]. Dostupné z: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>. [Ke dni: 16-bře-2020].
- [8] „Evropská komise - Zelená dohoda pro Evropu". [Online]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs. [Ke dni: 04-kvě-2020].
- [9] M. Petreje, „Teplotní režim zkušebních ploch zelených střech", České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [10] H. King, „Scoria". [Online]. Dostupné z: <https://geology.com/rocks/scoria.shtml>. [Ke dni: 03-bře-2020].
- [11] S. Cascone, „Green roof design: State of the art on technology and materials", *Sustainability*, vydání 11, s. 3020, 2019.
- [12] L. Joseph, *RICE: Chemistry and Technology*, 4th Editio. ISBN: 9780128115091, 2004.
- [13] K. Břendová, P. Tlustoš, J. Száková, & M. Bohuněk, „Využití biouhlí (biocharu) k úpravě půdních vlastností", *Biom.cz*, 2015. [Online]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-biouhli-biocharu-k-uprave-pudnich-vlastnosti>. [Ke dni: 10-čvc-2020].
- [14] A. Fojtíková, „Využití biocharu ve vztahu k ochraně životního prostředí", Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2017.
- [15] J. Cox et al., *Biochar in horticulture Prospects for the use of biochar in Australian horticulture*. ISBN: 9781742563497, 2012.
- [16] K. Kuoppamäki, M. Hagner, S. Lehvävirta, & H. Setälä, „Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity", *Ecological Engineering*, vydání 88, s. 1–9, 2016.
- [17] „V4 Biochar Platform". [Online]. Dostupné z: <https://v4biochar.czu.cz/cs/r-15068-o-biocharu>. [Ke dni: 28-říj-2020].
- [18] D. A. Beck, G. R. Johnson, & G. A. Spolek, „Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality", *Environmental Pollution*, vydání 159, s. 2111–2118, 2011.

- [19] K. Kuoppamäki & S. Lehvävirta, „Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar", *Landscape and Urban Planning*, vydání 152, s. 39–48, 2016.
- [20] „Integrovaný registr znečišťování". [Online]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/25>. [Ke dni: 16-bře-2020].
- [21] V. Klusák & H. Jan, „Biouhel, alespoň stéblo naděje", *Veronica*, vydání 5, 2009.
- [22] S. Burian, J. Dostálová, M. Dubský, P. Halama, K. Chaloupka, & J. Komzák, *Vegetační souvrství zelených střech - Standardy pro navrhování, provádění a údržbu*. Odborná sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně, 2019.
- [23] G. Lösken, *FLL Green Roof Guidelines - Guidelines for the Planning, construction and maintenance of Green roofs*. Bonn: Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL): ISBN: 3934484816, 2018.
- [24] C. Cao, C. Farrell, P. Kristiansen, & J. Rayner, „Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants", *Ecological Engineering*, vydání 71, s. 368–374, 2014.
- [25] Z. Qianqian, M. Liping, W. Huiwei, & W. Long, „Analysis of the effect of green roof substrate amended with biochar on water quality and quantity of rainfall runoff", *Environmental Monitoring and Assessment*, vydání 191, 2019.
- [26] T. Young, D. D. Cameron, J. Sorrill, T. Edwards, & G. K. Phoenix, „Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance", *Urban Forestry and Urban Greening*, vydání 13, s. 507–516, 2014.
- [27] A. Graceson, N. Hall, M. Hare, & J. Monaghan, „Spatial arrangements and physical properties of granular mineral materials and composted green waste in green roof growing media", *Acta Horticulturae*, vydání 1013, s. 147–152, 2013.
- [28] A. Graceson, M. Hare, J. Monaghan, & N. Hall, „The water retention capabilities of growing media for green roofs", *Ecological Engineering*, vydání 61, s. 328–334, 2013.
- [29] A. Karczmarczyk, A. Baryla, & P. Kozuchowski, „Design and development of low P-emission substrate for the protection of urban water bodies collecting green roof runoff", *Sustainability*, vydání 9, 2017.
- [30] K. Vijayaraghavan & U. M. Joshi, „Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity", *Landscape and Urban Planning*, vydání 143, s. 25–32, 2015.
- [31] B. S. Sharratt, *Water Retention, Bulk Density, Particle Size, and Thermal and Hydraulic conductivity of Arable Soils in Interior Alaska*. 1990.
- [32] A. K. Srivastava, „Researchgate.net - otázky a odpovědi", 2017. [Online]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/post/What-is-the-difference-between-soil-water-content-and-water-holding-capacity-WHC-from-a-soil-ecological-point-of-view>. [Ke dni: 24-pro-2020].
- [33] Agvise Laboratories, „Water Holding Capacity". [Online]. Dostupné z: <https://www.agvise.com/educational-articles/water-holding-capacity/>. [Ke dni: 31-říj-2020].
- [34] ScienceCuriosity, „Water Holding Capacity of Soil - YouTube". [Online]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=w1r336ykE9E&ab_channel=ScienceCuriosity. [Ke dni: 31-říj-2020].
- [35] „Determine the water holding capacity of soil Class 12th bio practical - YouTube". [Online]. Dostupné z:

- https://www.youtube.com/watch?v=87h6BGKxE3c&ab_channel=letmeexplainnowbharatpanwar. [Ke dni: 31-říj-2020].
- [36] „Water holding capacity of soils - YouTube". [Online]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=s8OyW_LkFnM&ab_channel=LabInApp. [Ke dni: 31-říj-2020].
- [37] P. Ampim, J. Sloan, R. Cabrera, D. Harp, & F. Jaber, „Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties", *Environ. Hort*, vydání 28, s. 244–252, 2010.
- [38] T. Emilsson, J. Czemieli Berndtsson, J. E. Mattsson, & K. Rolf, „Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems", *Ecological Engineering*, vydání 29, s. 260–271, 2007.
- [39] J. C. Berndtsson, T. Emilsson, & L. Bengtsson, „The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality", *Science of the Total Environment*, vydání 355, s. 48–63, 2006.
- [40] D. Laird, P. Fleming, B. Wang, R. Horton, & D. Karlen, „Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil", *Geoderma*, vydání 158, č. 3–4, s. 436–442, zář. 2010.
- [41] S. Dalahmeh, L. Ahrens, M. Gros, K. Wiberg, & M. Pell, „Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm", *Science of the Total Environment*, vydání 612, s. 192–201, 2018.
- [42] D. Qiu, H. Peng, T. Li, & Y. Qi, „Application of stabilized sludge to extensive green roofs in Shanghai: Feasibility and nitrogen leaching control", *Science of the Total Environment*, vydání 732, s. 138898, 2020.
- [43] „Odpadní voda - Pražské vodovody a kanalizace, a.s." [Online]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/>. [Ke dni: 13-pro-2020].
- [44] „ASIO, spol. s r.o. - Color of water". [Online]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/177.color-of-water-deleni-vod>. [Ke dni: 13-pro-2020].
- [45] „Grey Water - Definition from ecolife.com". [Online]. Dostupné z: <http://www.ecolife.com/define/grey-water.html>. [Ke dni: 13-pro-2020].
- [46] „Druhy vod podle kvality a požadavky na kvalitu vody - ESTAV.cz". [Online]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/5941.druhy-vod-podle-kvality-a-pozadavky-na-kvalitu-vody>. [Ke dni: 13-pro-2020].
- [47] K. S. Oh, J. Y. C. Leong, P. E. Poh, M. N. Chong, & E. Von Lau, „A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia", *Journal of Cleaner Production*, vydání 171, s. 17–29, 2018.
- [48] I. Chirisa, E. Bandaiko, A. Matamanda, & G. Mandisvika, „Decentralized domestic wastewater systems in developing countries: the case study of Harare (Zimbabwe)", *Applied Water Science*, vydání 7, s. 1069–1078, 2017.
- [49] K. Niewitecka, „Possibilities of heat energy recovery from greywater systems", *E3S Web of Conferences*, vydání 30, s. 1–8, 2018.
- [50] I. N. Shaikh & M. M. Ahammed, „Quantity and quality characteristics of greywater: A review", *Journal of Environmental Management*, vydání 261, 2020.
- [51] K. Plotěný, „Využití šedých a dešťových vod v budovách - TZB-info", 2013. [Online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/destova-voda/10121-vyuziti-sedych-a-destovych-vod-v-budovach>.

[Ke dni: 14-pro-2020].

- [52] D. Stránský, „Přednáška předmětu Ekotoxikologie a odvodnění urbanizovaných území, Fakulta stavební ČVUT“, 2020.
- [53] W. W. Kadewa, G. Knops, M. Pidou, P. Jeffrey, B. Jefferson, & K. S. Le Corre, „What is the impact of personal care products selection on greywater characteristics and reuse?“, *Science of the Total Environment*, vydání 749, 2020.
- [54] V. Jirmus, „Recyklace šedé vody – nevyužitý zdroj uvnitř budovy“, 2016. [Online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/uspory-voda-kanalizace/14210-recyklace-sede-vody-nevyuzity-zdroj-uvnitř-budovy>. [Ke dni: 12-kvě-2020].
- [55] L. Matějů & Z. Boštková, „Mikrobiologie šedých vod“, 2019.
- [56] ASIO spol. s r.o., „AS-GW/AQUALOOP - projekční a instalační podklady“. 2013.
- [57] M. Blanky, Y. Sharaby, S. Rodríguez-Martínez, M. Halpern, & E. Friedler, „Greywater reuse - Assessment of the health risk induced by Legionella pneumophila“, *Water Research*, vydání 125, s. 410–417, 2017.
- [58] K. W. Shi, C. W. Wang, & S. C. Jiang, „Quantitative microbial risk assessment of Greywater on-site reuse“, *Science of the Total Environment*, vydání 635, s. 1507–1519, 2018.
- [59] A. Maimon, E. Friedler, & A. Gross, „Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse“, *Science of the Total Environment*, vydání 487, s. 20–25, 2014.
- [60] W. H. O. 4th Edition, *Guidelines for Drinking-water Quality*, vydání 1. ISBN: 92 4 154696 4, 2011.
- [61] F. Li, K. Wichmann, & R. Otterpohl, „Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses“, *Science of the Total Environment*, vydání 407, č. 11, s. 3439–3449, 2009.
- [62] V. Nikolic, D. Milicevic, & S. Milenkovic, „Wetlands, constructed wetlands and their role in wastewater treatment with principles and examples of using it in Serbia“, *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, vydání 7, č. 1, s. 65–82, 2009.
- [63] „Kořenová čistička – proces čištění“. [Online]. Dostupné z: <https://www.korenova-cisticka.cz/o-korenovkach/fungovani/Korenova-cisticka-korenova-cistirna-proces-cisten.html>. [Ke dni: 14-pro-2020].
- [64] C. Picard, L. Fraser, & D. Steer, „The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms“, *Bioresource Technology*, vydání 96, s. 1039–1047, 2005.
- [65] „Rostliny pro kořenovou čističku“. [Online]. Dostupné z: <https://www.korenova-cisticka.cz/o-korenovkach/fungovani/Korenova-cisticka-korenova-cistirna-rostliny-pro-korenovou-cisticku.html>. [Ke dni: 10-zář-2020].
- [66] A. W. Shafran, A. Gross, Z. Ronen, N. Weisbrod, & E. Adar, „Effects of surfactants originating from reuse of greywater on capillary rise in the soil“, *Water Science and Technology*, vydání 52, s. 157–166, 2005.
- [67] J. Vrána, „Nová evropská norma pro využití srážkových vod“, 2018. [Online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/destova-voda/17616-nova-evropska-norma-pro-vyuziti-srazkovych-vod>. [Ke dni: 04-kvě-2020].
- [68] World Health Organization, Ed., *Safe use of wastewater, excreta and greywater – excreta and*

- greywater use in agriculture*, vydání 4. ISBN: 92 4 154685 9, 2014.
- [69] „Šedá voda | Homes by Skanska". [Online]. Dostupné z: <https://reality.skanska.cz/seda-voda>. [Ke dni: 19-říj-2020].
- [70] M. Sněhota, M. Petreje, T. Pavlů, T. Chorazy, & J. Raček, „Užitný vzor 34 637", 2020.
- [71] J. Vokál, „PODNIKOVÁ NORMA - STŘEŠNÍ SUBSTRÁT ACRE", Velký Osek, 2011.
- [72] „Extenzivní substrát typ E - technický list". [Online]. Dostupné z: www.optigreen.com. [Ke dni: 28-lis-2020].
- [73] „Software a data | TOMST". [Online]. Dostupné z: <https://tomst.com/web/cz/systemy/tms/software/>. [Ke dni: 21-pro-2020].
- [74] J. Wild, M. Kopecký, M. Macek, M. Šanda, J. Jankovec, & T. Haase, „Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement", *Agricultural and Forest Meteorology*, vydání 268, s. 40–47, dub. 2019.
- [75] „TOMST Measurement System - TMS manuál". [Online]. Dostupné z: www.tomst.com. [Ke dni: 09-lis-2020].
- [76] L. Zotarelli, M. D. Dukes, C. C. Romero, K. W. Migliaccio, & K. T. Morgan, „Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)".
- [77] T. Houdek, „Metody stanovení evapotranspirace a její hodnoty v České republice", JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUĎĚJOVICÍCH, České Budějovice, 2012.
- [78] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, & M. Smith, *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. ISBN: 92-5-104219-5, 1998.
- [79] T. J. Sauer & R. Horton, „Soil Heat Flux", 2005.
- [80] V. Ponce, „The psychrometric constant", 2014. [Online]. Dostupné z: http://ponce.sdsu.edu/psychrometric_constant.html. [Ke dni: 14-lis-2020].
- [81] „Rosný bod – Wikipedie". [Online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rosný_bod. [Ke dni: 14-lis-2020].
- [82] V. Novák, *Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania*. ISBN: 80-224-0409-8, 1995.
- [83] E. T. Linacre, „A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone", *Agricultural Meteorology*, vydání 18, s. 409–424, 1977.
- [84] „Střešní substrát ACRE extenzivní - Souhlas s uvedením ohlášené pomocné látky do oběhu", 2016. [Online]. Dostupné z: www.acre.cz. [Ke dni: 07-říj-2020].
- [85] K. Liu & J. Minor, „Performance evaluation of an extensive green roof", *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 2005.
- [86] J. Slim, „Why Do Succulents Turn Red Or Change Colors? - Succulent Plant Care". [Online]. Dostupné z: https://succulentplantcare.com/why-do-succulents-turn-red-or-change-colors/?fbclid=IwAR3XpprRF8MpXQxxpJYdLNLsF9a2DD-yXP8aEgI_fdhU6CTqWjb8zx2SnU. [Ke dni: 27-lis-2020].
- [87] W. Hopkins & N. Hüner, *Introduction to Plant Physiology*, 4. vyd., vydání 4. The University of Western Ontario: ISBN: 9780470247662, 2009.
- [88] K. Hýblerová, „Hnojivé účinky čistírenských kalů pro topoly", *Biom.cz*, 2005. [Online]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/hnojive-ucinky-cistirenskych-kalu-pro-topoly>.

[Ke dni: 22-pro-2020].

- [89] J. Raček, „Metodika návrhu systému využití šedých vod ve vybraných objektech“, Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [90] A. Baroš & J. Martinek, *Kniha Smíšené trvalkové výsadby*. ISBN: 9788086726847, 2018.
- [91] S. Murphy, „General Information on Phosphorus“, *BASIN*. [Online]. Dostupné z: http://bcn.boulder.co.us/basin/data/NEW/info/TP.html?fbclid=IwAR161NOgPnJTvlm1w4PEI3irAP7EXPrar7TQ0YohddZRqdsQ_bdNFCS0qNY. [Ke dni: 04-pro-2020].




14 Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol o zkoušce čistírenského kalu

Příloha 2: Teploty měřené na experimentálních plochách

Příloha 1: Protokol o zkoušce čistírenského kalu

	ENVIRO - EKOANALYTIKA, s.r.o. Zkušební laboratoř Nad Kunšovcem 1405/2, 594 01 Velké Meziříčí tel/fax.: 566 523 444, e-mail: laborator@enviroeko.cz Zkušební laboratoř č.1406 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005		

PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 1694/2019

Číslo vzorku: 1667/2019

Objednatel : Technické služby Třešť, spol. s r.o., Nádražní 851, 589 01 Třešť

Místo a bod odběru : ČOV Třešť za lisem

Předmět zkoušky : kal

Datum a čas odběru : 5.3.2019 13:00

Způsob odběru : směsný

Odběr provedl : Objednatel

Datum a čas příjmu : 5.3.2019 15:00

Datum analýz: 5.3.2019 - 11.4.2019

Ukazatel	Jednotka	Zjištěná hodnota	Nejistota	Limit	Použitá metoda	
Kadmium	mg/kg suš.	0,89	±15%	5	SOP 24A (+)	1
Chrom celk.	mg/kg suš.	32,4	±15%	200	SOP 23A (+)	1
Měď	mg/kg suš.	107	±15%	500	SOP 23A (+)	1
Rtuť	mg/kg suš.	0,886	±15%	4	SOP 27 (ČSN 75 7440, ČSN 46 5735)	1
Nikl	mg/kg suš.	22,3	±20%	100	SOP 23A (+)	1
Olovo	mg/kg suš.	27,1	±15%	200	SOP 23A (+)	1
Zinek	mg/kg suš.	644	±20%	2500	SOP 23A (+)	1
Termotolerantní koliformní bakterie	KT/J/g suš.	1,5x10⁵		1x10 ⁶		s
Intestinální enterokoky	KT/J/g suš.	1,2x10⁵		1x10 ⁶		s
pH		6,10	±0,2		SOP 18 (+)	1
Sušina	% hm.	14,2	±10%		SOP 25A (+)	1
Salmonella	/50 g	negativní				s

* zkouška a/nebo postup odběru není předmětem akreditace s zkouška prováděná subdodávkou v AZL č. 1393

1 - zkouška prováděná na pracovišti 1, Třebíčská 1540

Limity jsou dané Vyhl. č. 437/2016 Sb. příl. č. 7 kal kat. II v aktuálním znění.

Nejistota měření je v souladu s dokumentem EA - 4/16 a nezahrnuje nejistotu vzorkování.

+SOP 24A ČSN EN ISO 5961, ČSN EN 1233, ČSN EN ISO 15686, ČSN 46 5735

+SOP 23A TNV 75 7408, ČSN ISO 7980, ČSN EN ISO 5961, ČSN ISO 8288, ČSN EN 1233, ČSN ISO 9964-3, ČSN 75 7385, ČSN 46 5735

+SOP 18 JPP ÚKZÚZ 2002, ČSN ISO 10390, ČSN EN 12176, ČSN 46 5735

+SOP 25A ČSN ISO 11 465, ČSN EN 12 880, ČSN EN 15934, ČSN EN 15935, ČSN 46 5735

Výsledky zkoušek se týkají pouze předmětu zkoušky a nenahrazují jiné dokumenty.

Bez písemného souhlasu laboratoře se protokol nesmí reprodukovat jinak než celý.

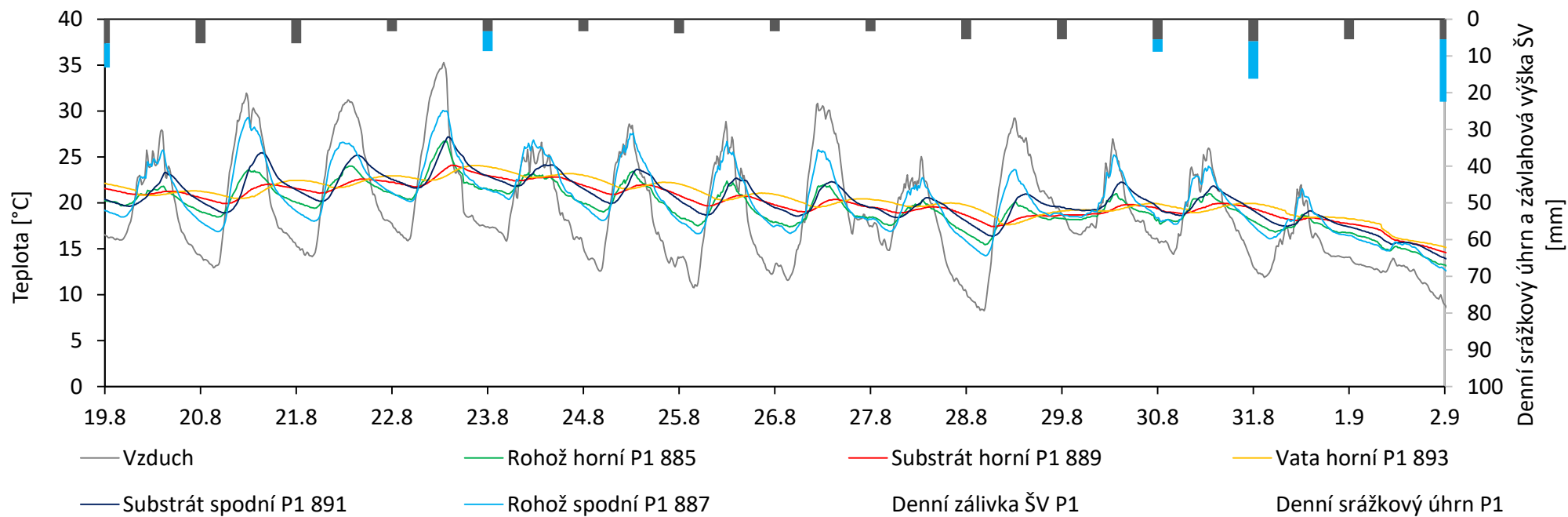
Protokol vystaven dne: 11.4.2019

RNDr. Růžena Konečná
vedoucí divize základních metod

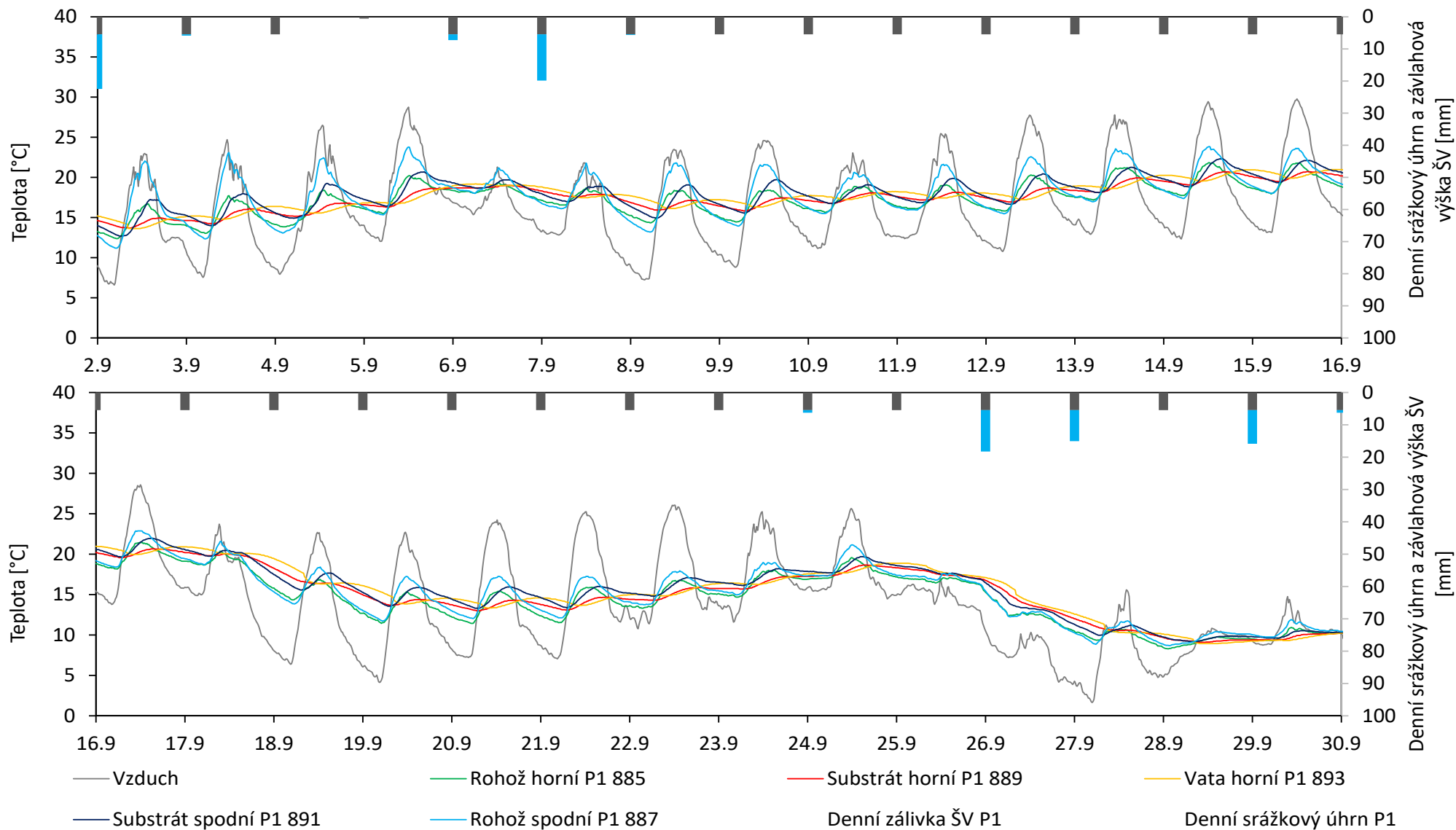


Příloha 2: Teploty měřené na experimentálních plochách

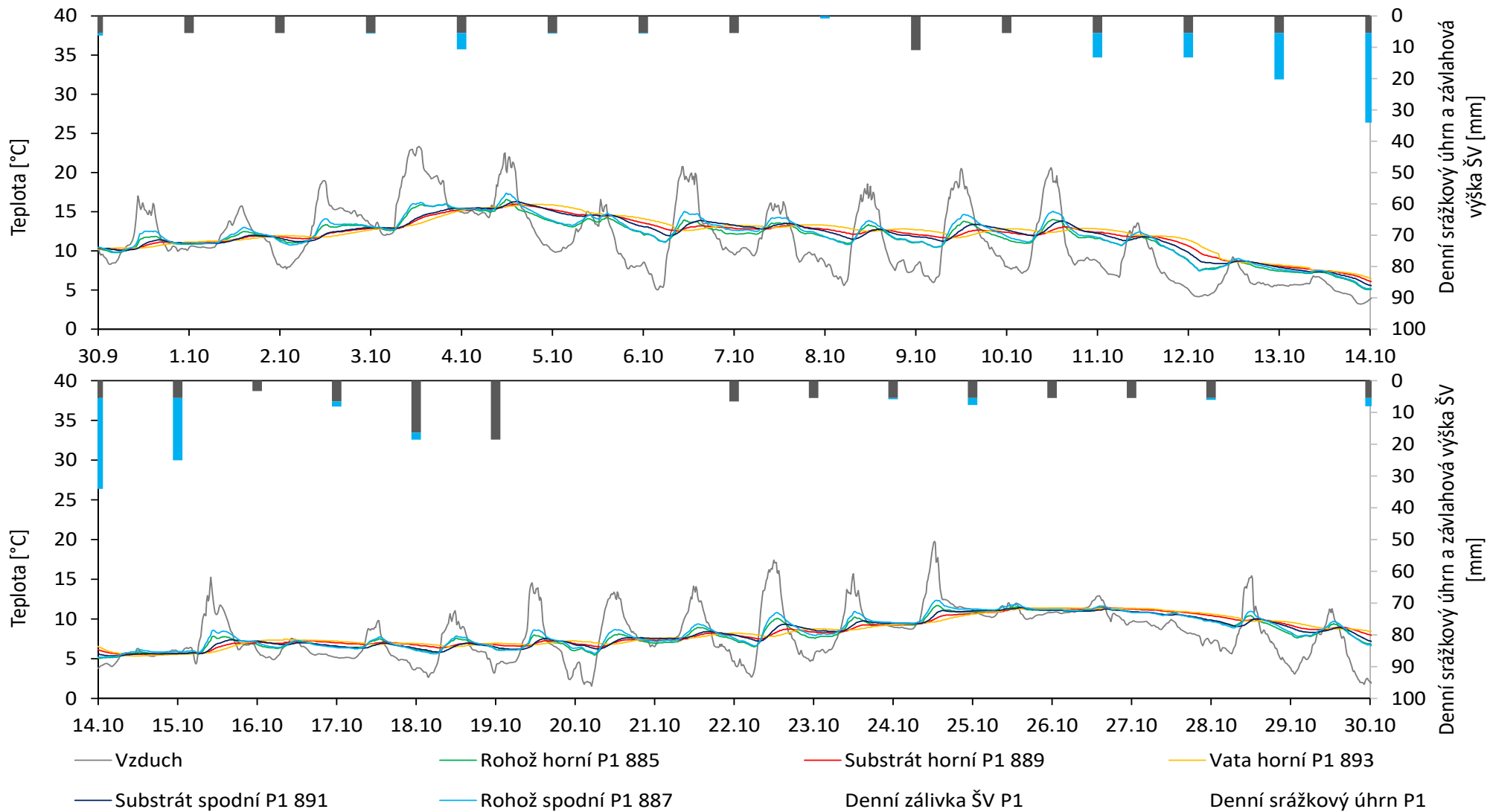
Teplotní průběhy na ploše P1 (s biouhlem)



Obrázek 47: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 19.8. až 2.9.2020

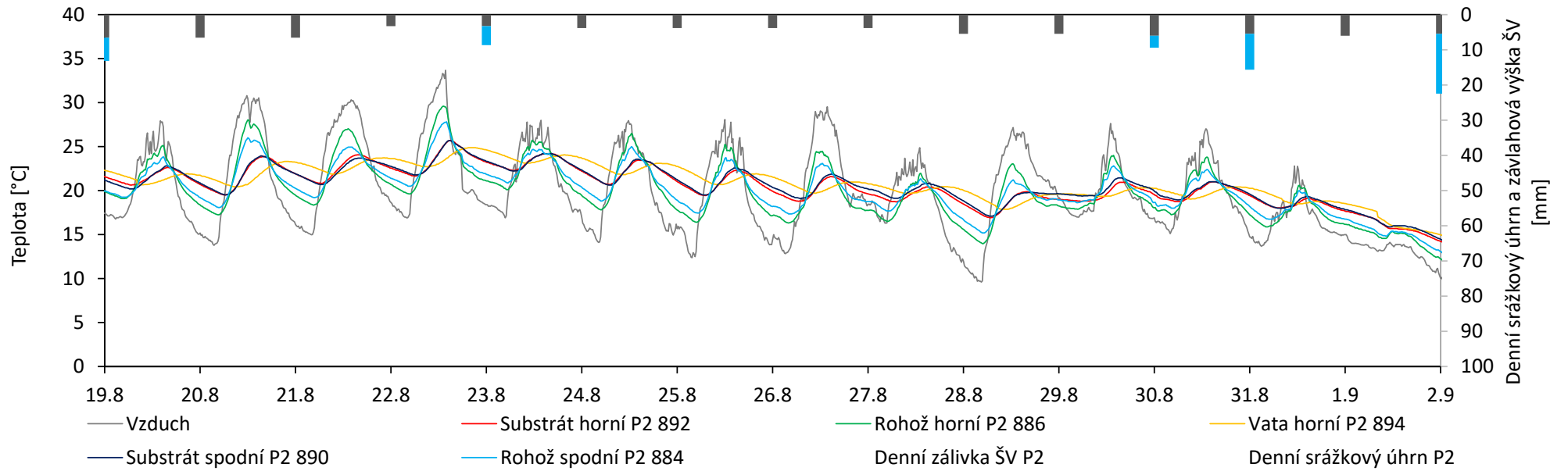


Obrázek 49: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 2.9. až 30.9.2020

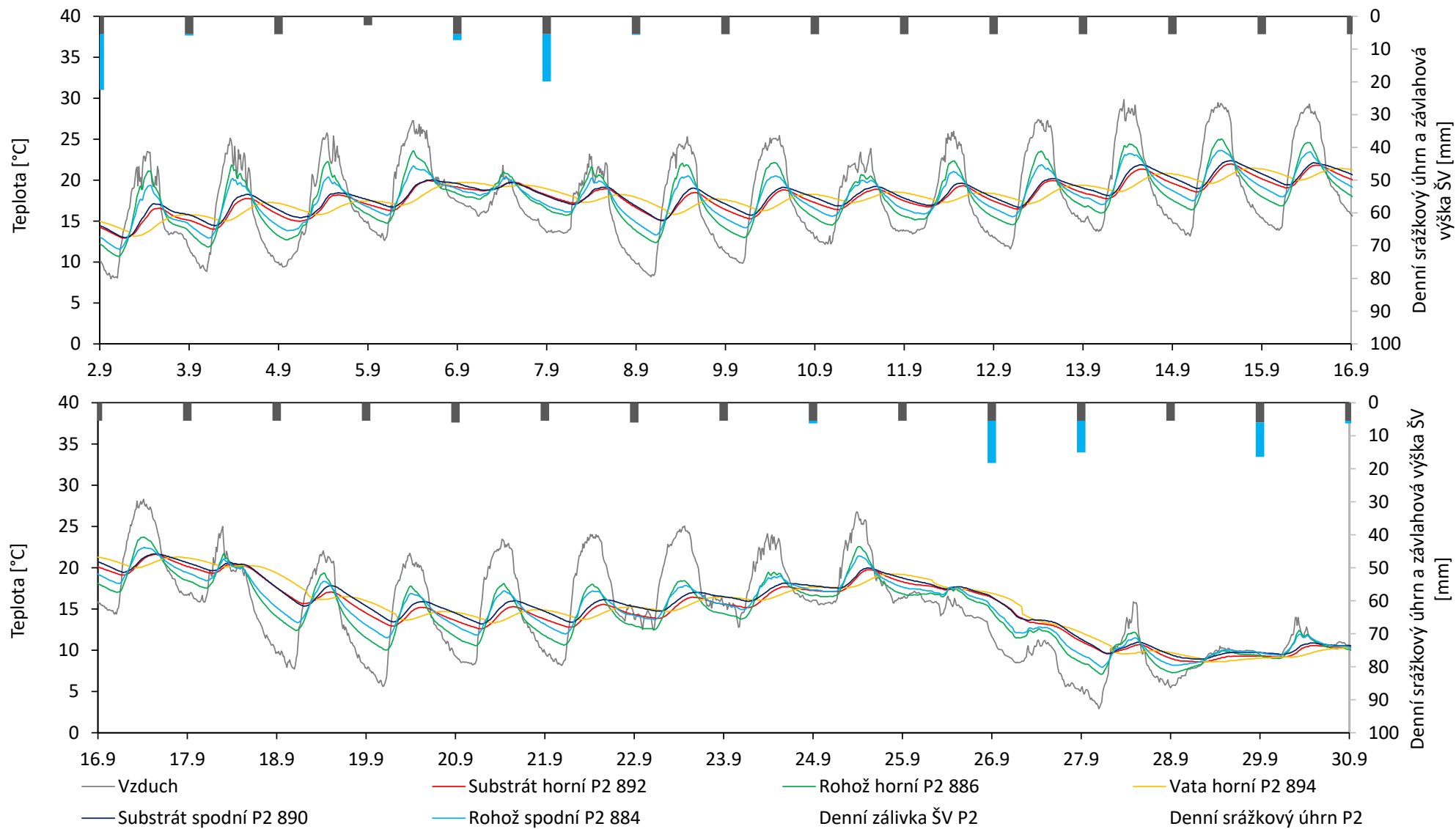


Obrázek 51: Teplota dle TOMST čidel na ploše P1 (s biouhlem) ve dnech 30.9. až 30.10.2020

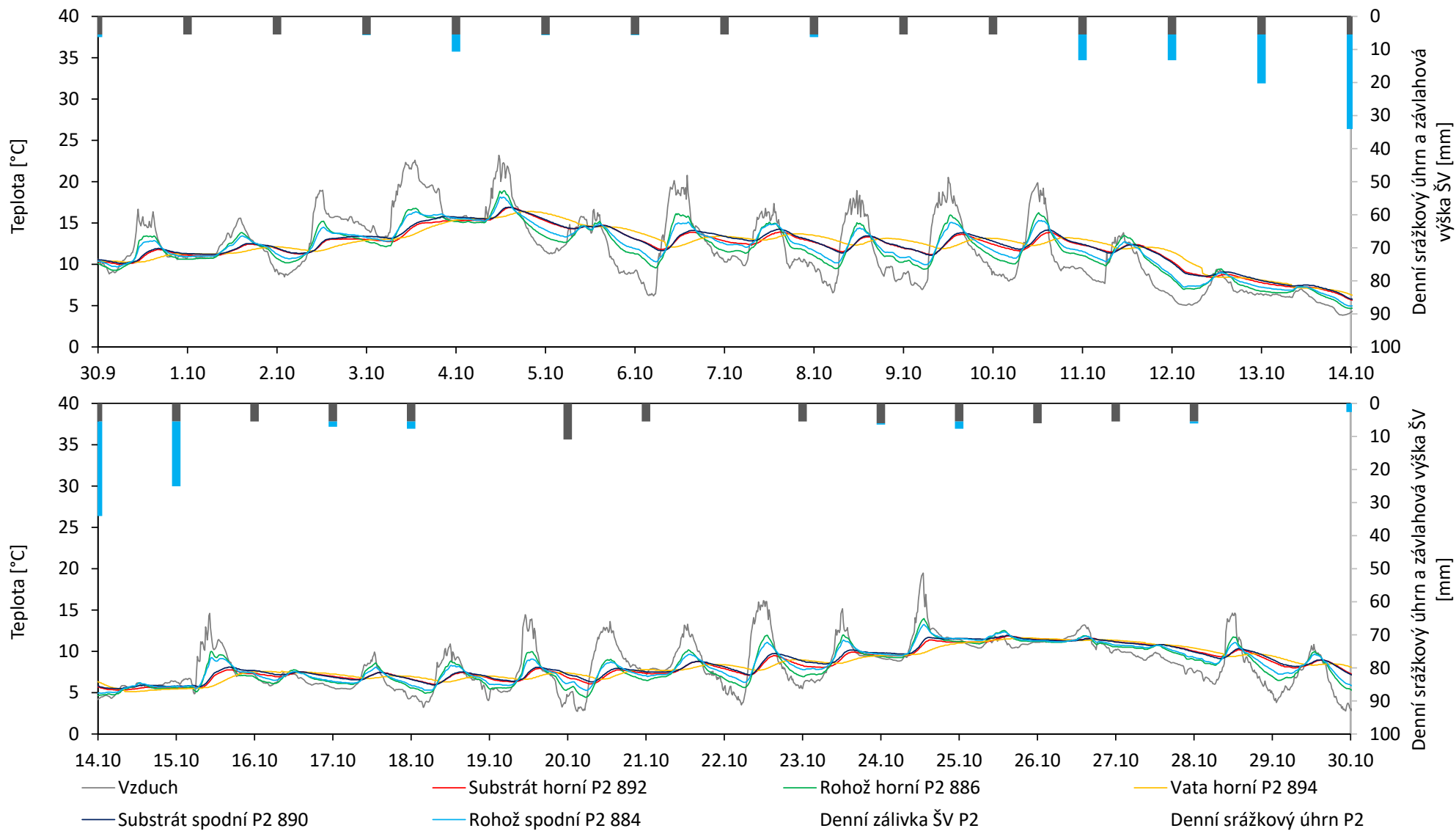
Teplotní průběhy na ploše P2 (bez biouhlu)



Obrázek 52: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 19.8. až 2.9.2020



Obrázek 54: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 2.9. až 30.9.2020



Obrázek 56: Teplota dle TOMST čidel na ploše P2 (bez biouhlu) ve dnech 30.9. až 30.10.2020

