

TRNAVSKÁ UNIVERZITA V TRNAVE

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

30725

**VYUŽITIE BIOUHLIA AKO ADITÍVA DO SUBSTRÁTOV PRE EXTENZÍVNE
ZELENÉ STRECHY**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2022

Bc. Jana Urbanová

TRNAVSKÁ UNIVERZITA V TRNAVE
PEDAGOGICKÁ FAKULTA

**VYUŽITIE BIOUHLIA AKO ADITÍVA DO SUBSTRÁTOV PRE EXTENZÍVNE
ZELENÉ STRECHY**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program: učiteľstvo biológie a chémie
Školiace pracovisko: katedra chémie
Študijný odbor: učiteľstvo a pedagogické vedy
Vedúci bakalárskej práce: mim. prof. RNDr. Martin Pipíška, PhD.

Trnava, 2022

Bc. Jana Urbanová

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

pre:

Bc. Jana Urbanová, rod. Urbanová

Odbor: Učiteľstvo a pedagogické vedy

Študijný program: učiteľstvo biológie a chémie

Vzhľadom k tomu, že ste splnili požiadavky učebného plánu, zadáva Vám dekan fakulty na návrh vedúceho vedecko-pedagogického pracoviska v zmysle zákona o VŠ č.131/2002 Z.z a Študijného poriadku TU §15, ods. 3, túto tému záverečnej práce:

Využitie biouhlia ako aditíva do substrátov pre extenzívne zelené strechy

POKYNY NA VYPRACOVANIE

Osnova práce:

- vypracovanie literárneho prehľadu zameraného na vlastnosti substrátov pre zelené strechy a možné využitie biouhlia ako zložky extenzívnych strešných substrátov,
- v laboratórnych experimentoch charakterizovať extenzívny strešný substrát s prídavkom 10 a 20% biouhlia na báze čistiarenských kalov,

- v reálnych podmienkach charakterizovať vodozádržnú kapacitu pripravených substrátov,
- spracovanie výsledkov a formulovanie záverov.

Rozsah laboratórnych a grafických prác:

Rozsah záverečnej práce:

Zoznam odporúčanej literatúry:

Vedúci záverečnej práce: mim. prof. RNDr. Martin Pipiška, PhD.

Konzultant:

Dátum zadania záverečnej práce: 28.10.2020

Dátum priradenia záverečnej práce študentovi: 28.10.2020

Dátum odovzdania záverečnej práce:

.....
doc. Ing. Viera Peterková, PhD.
dekanka fakulty

.....
vedúci vedecko-pedagogického pracoviska

Čestné vyhlásenie:

Dole podpísaná, Jana Urbanová, týmto čestne prehlasujem, že som predloženú diplomovú prácu vypracovala samostatne, s použitím uvedenej literatúry. Som si vedomá možných právnych dôsledkov, ktoré vyplývajú z nepravdivých údajov.

V Trnave, dňa 12.4.2022

podpis

Pod'akovanie:

Úprimné pod'akovanie patrí najmä môjmu školiteľovi, vedúcemu práce, mim. prof. RNDr. Martinovi Pipíškovi, PhD., za jeho pomoc, podporu, ochotu, trpezlivosť a ľudský prístup počas zhotovovania diplomovej práce. Za odbornú pomoc pri realizácii experimentov by som chcela pod'akovať RNDr. Vladimírovi Frištákovi, PhD..

Abstrakt

URBANOVÁ, Jana: Využitie biouhlia ako aditíva do substrátov pre extenzívne zelené strechy. Diplomová práca, Trnavská univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra chémie. Vedúci diplomovej práce: mim. prof. RNDr. Martin Pipiška, PhD. Trnava: Pedagogická fakulta TU, 2022. 92 s.

Výrazné klimatické zmeny, ktorých dopad je čoraz častejšie pozorovateľný aj v mestách, zintenzívňujú záujem o rozširovanie zelených plôch v mestských oblastiach. Inovatívnym riešením v tejto oblasti sú prvky zelenej infraštruktúry ako napr. zelené strechy. Najdôležitejšiu časť zelených strešných systémov tvorí rastový substrát. Ten je esenciálnou zložkou pre rast rastlín, pričom ale vytvára najväčšiu záťaž na pôvodnú strešnú krytinu. Preto sme sa v predkladanej diplomovej práci zamerali na modifikáciu extenzívneho viacvrstvého strešného substrátu s cieľom zlepšiť jeho fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti a tým podporiť pozitívny vplyv zelene na mestskú mikroklimu. Z výsledkov testovania komerčného extenzívneho strešného substrátu a substrátov modifikovaných prídavkom pyrolyzovaných čistiarenských kalov v laboratórnych podmienkach je zrejmé, že všetky spĺňajú minimálne požiadavky pre strešné substráty, tak ako ich definuje FLL norma. Prídavok biouhlia v množstve 10 a 20 % (v/v) pritom zlepšuje kľúčové parametre komerčného substrátu. Biouhlie zvyšuje pH, pórovitosť, obsah vzduchu a maximálnu vodnú kapacitu substrátu. Naopak, znižuje EC, TDS a objemovú hmotnosť v suchom aj nasýtenom stave. Takto charakterizované substráty boli použité na skonštruovanie dvanástich experimentálnych zelených plôch uložených na streche PdF TU v Trnave. Tieto sme monitorovali v období od októbra 2020 do apríla 2022. Výsledky indikujú, že substráty s biouhlím majú vyššiu retenčnú kapacitu a tým aj vyššiu vlhkosť v porovnaní s komerčným substrátom. Vďaka tomu výraznejšie podporujú úspešnosť rastlín aj v suchých obdobiach. Z pozorovania vyplýva, že substrát s 10% prídavkom biouhlia sa javí ako najvhodnejší pre podporu rastu vegetácie. Prídavok biouhlia nemal výrazný vplyv na pH, EC a CHSK odtekajúcej vody z experimentálnych zelených plôch.

Kľúčové slová: zelené strechy, extenzívny viacvrstvý strešný substrát, biouhlie, vlastnosti substrátov, vodozadržná kapacita

Abstract

URBANOVÁ, Jana: The use of biochar as an additive in substrates for extensive green roofs. Master thesis, Trnava University, Faculty of Education, Department of Chemistry. Thesis supervisor: mim. prof. RNDr. Martin Pipíška, PhD. Trnava: Faculty of Education TU, 2022. 92 s.

Significant climate change, the impact of which is increasingly visible in cities, is intensifying interest in the expansion of green spaces in urban areas. Innovative solutions in this area are green infrastructure elements such as green roofs. The most important part of green roof systems is the growing medium. This is an essential component for plant growth, but it creates the greatest load on the original roof covering. Therefore, in the present thesis, we focused on the modification of an multi-layer extensive roof substrate in order to improve its physical and physicochemical properties and thus promote the positive impact of greenery on the urban microclimate. From the results of testing commercial extensive substrate and substrates modified by the addition of pyrolysed sewage sludge under laboratory conditions, it is evident that they all meet the minimum requirements for roofing substrates as defined by the FLL standard. The addition of biochar at 10 and 20 % (v/v) improves the key parameters of the commercial substrate. Biochar increases the pH, porosity, air content and maximum water capacity of the substrate. Conversely, it reduces EC, TDS and bulk density in both dry and saturated state. Substrates characterized in this way were used to construct twelve experimental green plots placed on the roof of the PdF TU in Trnava. These were monitored between October 2020 and April 2022. The results indicate that the biochar substrates have a higher moisture retention capacity and thus higher moisture content compared to the commercial substrate. This makes them more conducive to plant success even in dry periods. Observation shows that a substrate with a 10% addition of biochar appears to be the most suitable for promoting vegetation growth. The addition of biochar had no significant effect on pH, EC and COD of the runoff water from the experimental green plots.

Keywords: green roofs, multi-layer extensive roof substrate, biochar, substrate properties, water holding capacity

Obsah

Zoznam obrázkov	11
Zoznam tabuliek	14
Úvod	15
1. Literárny prehľad	16
1.1. Konštrukcia zelených striech	17
1.2. Biouhlie	19
1.3. Vodozadržná kapacita zelených striech	22
1.3.1. Vplyv substrátu na vodozadržnú kapacitu extenzívnych zelených striech	23
1.3.2. Evapotranspirácia	24
1.3.3. Vplyv biouhlia na vodozadržnú kapacitu extenzívnych strešných substrátov	27
1.4. Vegetácia extenzívnych zelených striech	29
1.4.1. Vplyv extenzívneho strešného substrátu na vegetáciu	30
1.4.2. Vplyv prídavku biouhlia na rastliny extenzívnych strešných substrátov	32
1.5. Kvalita odtekajúcej dažďovej vody	34
1.5.1. Vplyv extenzívneho strešného substrátu na kvalitu odtekajúcej dažďovej vody	34
1.5.2. Kvalita dažďovej vody odtekajúcej zo substrátu s prídavkom biouhlia	36
2. Ciele	37
3. Materiál a metódy	38
3.1. Prístroje	38
3.2. Laboratórne experimenty	38
3.2.1. Príprava strešných substrátov	38
3.2.2. Objemová hmotnosť strešných substrátov	40
3.2.3. Permeabilita strešných substrátov	41
3.2.4. Obsah vzduchu a pórovitosť substrátov	42
3.2.5. TDS a EC extenzívnych strešných substrátov	42
3.2.6. pH extenzívnych strešných substrátov	43
3.2.7. Vlhkosť, obsah popola a množstvo organických látok strešných substrátov	43
3.2.8. CEC extenzívnych strešných substrátov	44
3.2.9. Zrornosť strešných substrátov	44
3.3. Terénny experiment	45
3.3.1. Experimentálna zelená strecha	45
3.3.2. Monitorovanie pôdnej vlhkosti a poveternostných podmienok	46

3.3.3. pH, EC, TDS a CHSK vo vode odtekajúcej z extenzívnych strešných substrátov	47
3.3.4. Rastlinný pokryv substrátu	48
4. Výsledky a diskusia	49
4.1. Charakteristika pripravených strešných substrátov v laboratórnych podmienkach	49
4.1.1. Objemová hmotnosť a maximálna vodná kapacita	49
4.1.2. Permeabilita	50
4.1.3. Pórovitosť a obsah vzduchu	51
4.1.4. pH, EC a TDS	51
4.1.5. CEC	52
4.1.6. Obsah popola a množstvo organických látok	53
4.1.7. Zrnitostné zloženie substrátov	54
4.2. Charakteristika pripravených strešných substrátov v reálnych podmienkach	56
4.2.1. Vodozádržná kapacita extenzívnych substrátov	57
4.2.2. Rastlinný pokryv substrátu	64
4.2.3. pH, EC, CHSK v eluátoch zo zelených striech	68
Záver	71
Zoznam použitej literatúry	72
Príloha 1	84

Zoznam obrázkov

- Obr. 1. Základné časti zelenej strechy (University of Maryland, 2021).
- Obr. 2. Rastliny rodu *Sedum* na modeli zelenej strechy (Mobilane, 2021).
- Obr. 3. Schéma nízkoteplotnej pyrolýzy spolu so vznikajúcimi produktami (upravené podľa Lehmann, 2007).
- Obr. 4. Benefity po aplikácii biouhlia do pôdy (upravené podľa Oni a kol., 2019).
- Obr. 5. Porovnanie materiálov používaných pre rastové substráty, A – keramzit (Rivashaa Eco Design Solutions Pvt Ltd, 2021), B – drvené tehly (ASQ Garden and Landscape, 2021).
- Obr. 6. Schéma evapotranspirácie (prevzaté zo SERC, 2021).
- Obr. 7. Energetická bilancia zelených striech (prevzaté od Clark a kol., 2010).
- Obr. 8. Graf distribúcie veľkosti častíc pre viacvrstvé extenzívne strešné substráty (FLL, 2018).
- Obr. 9. Vplyv biouhlia s rôznou veľkosťou častíc na výkonnosť rastlín (upravené podľa Liao a kol., 2022).
- Obr. 10. Náčrt modelu extenzívnej zelenej strechy s dvojvrstvovým substrátom (upravené podľa Gong a kol., 2014).
- Obr. 11. Fotografie pripravených extenzívnych strešných substrátov – komerčný substrát firmy JV Intersad, s.r.o. bez biouhlia (A), s 10% (B) a 20% prídavkom biouhlia na báze čistiarenských kalov (C).
- Obr. 12. Prevedenie experimentu realizovaného pri zisťovaní objemovej hmotnosti a permeability extenzívnych strešných substrátov.
- Obr. 13. Rozmiestnenie strešného experimentu: (A) substrát s 20% biouhlia, (B) substrát s 10% biouhlia, (C) substrát bez biouhlia, (D) senzory pôdnej vlhkosti a teploty SMT100, (E) zariadenie Quattro pre zber dát z váh, (F) datalogger Truelog 100, (G) nádoby na zber eluátu, (H) senzory na snímanie teploty, (I) solárny panel napájajúci váhy a zariadenie zberajúce dáta z váh, (J) váhy.
- Obr. 14. Uloženie boxov na drevených paletách. (A) Vážiace zariadenie s tenzometrickým senzorom Zemic 6LG.
- Obr. 15. Umiestnenie meteostanice Garni 935PC vo výške 2 m nad povrchom v blízkosti experimentálnych plôch zelených striech.
- Obr. 16. Krivka zrnitosti komerčného strešného substrátu (▲). Žltá farba predstavuje rozsah zrnitosti uvádzaný normou FLL (2018).
- Obr. 17. Krivka zrnitosti komerčného strešného substrátu s 10% prídavkom biouhlia (▲). Žltá farba predstavuje rozsah zrnitosti uvádzaný normou FLL (2018).

Obr. 18. Krivka zrnitosti komerčného strešného substrátu s 20% prídavkom biouhlia (▲). Žltá farba predstavuje rozsah zrnitosti uvádzaný normou FLL (2018).

Obr. 19. Denný úhrn zrážok (mm), vlhkosť vzduchu (%) a denná teplota (°C) v období od 7.10.2020 do 14.6.2021. Údaje z meteorologickej stanice Garni 935 PC.

Obr. 20. Denný úhrn zrážok (mm), vlhkosť vzduchu (%) a denná teplota (°C) v období od 14.6.2021 do 31.3.2022. Údaje z meteorologickej stanice Garni 935 PC.

Obr. 21. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v období jeseň – zima od 7.10.2020 do 15.3.2021. Červené stĺpce - dažďová voda pridaná do substrátov s prídavkom biouhlia (10 mm pridaných do substrátu s 10% biouhlia; 30 mm pridaných do substrátu s 20% biouhlia). Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Obr. 22. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (-) prídavkom biouhlia v období jeseň – zima od 30.10.2020 do 15.3.2021. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Obr. 23. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v jarnom období od 15.3.2021 do 25.5.2021. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Obr. 24. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (-) prídavkom biouhlia v jarnom období od 15.3.2021 do 28.5.2021. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Obr. 25. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v období leto – jeseň od 25.5.2021 do 7.10.2021. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Obr. 26. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (-) prídavkom biouhlia v období leto – jeseň od 28.5.2021 do 17.10.2021. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Obr. 27. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v období jeseň – zima od 13.10.2021 do 31.3.2022. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Obr. 28. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (-) prídavkom biouhlia v období jeseň – zima od 17.10.2021 do 31.3.2022. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Obr. 29. Experimentálna zelená plocha s čerstvo vysadenými rastlinami rodu *Sedum*.

Obr. 30. Priemerná hodnota pH (±SD) eluátov z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) prídavkom biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022. (* signifikantná prítomnosť rias v eluáte).

Obr. 31. Priemerné hodnoty elektrickej vodivosti (EC) eluátov (\pm SD) z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022.

Obr. 32. Priemerná chemická spotreba kyslíka (CHSK) v eluátoch (\pm SD) z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022.

Zoznam tabuliek

Tab. 1. Materiály používané pre extenzívne strešné substráty.

Tab. 2. Klimatologické a strešné parametre ovplyvňujúce proces evapotranspirácie (upravené podľa Cascone a kol., 2018).

Tab. 3. Prehľad surovín použitých na produkciu biouhlia, prípravu strešného substrátu a ich vplyv na retenciu vody pri prídavku biouhlia v množstve 5-10%.

Tab. 4. Percentuálne zloženie použitých extenzívnych strešných substrátov.

Tab. 5. Priemerné hodnoty objemovej hmotnosti (ρ_{wk} , ρ_t), maximálnej vodnej kapacity (VK) a vlhkosti (MC) substrátov realizované podľa FLL (2018) a ASTM D2974-13 (2013).

Tab. 6. Hodnoty permeability (K_f) substrátov porovnané s FLL (2018).

Tab. 7. Priemerné hodnoty pórovitosti (P_t) a obsahu vzduchu (P_g) substrátov porovnané s FLL (2018).

Tab. 8. Hodnoty pH, elektrickej vodivosti (EC) a celkového množstva rozpustených pevných látok (TDS) substrátov porovnané s FLL (2018).

Tab. 9. Priemerné hodnoty kationovej výmennej kapacity (CEC) substrátov.

Tab. 10. Obsah popola (AC) a množstvo organických látok (OC) v substrátoch porovnané s FLL (2018).

Tab. 11. Celkové množstvo zrážok (mm a L), eluátu (L) a vodozadržná kapacita (%) extenzívnych strešných substrátov bez a s prídavkom biouhlia (B) v období od októbra 2020 do marca 2022.

Tab. 12. Rastlinný pokryv substrátov bez biouhlia, s 10% a 20% prídavkom biouhlia počas jari 2021.

Tab. 13. Rastlinný pokryv substrátov bez biouhlia, s 10% a 20% prídavkom biouhlia v obdobiach jeseň 2021 a jar 2022.

Úvod

Zelené strechy sa stávajú atraktívnym spôsobom rozširovania vegetácie v mestských oblastiach. Ich budovanie nenaruša pôvodnú infraštruktúru a inovatívnym spôsobom vyplňa inak nevyužitý priestor. Sú vyhľadávané najmä vďaka ich schopnosti zadržiavať dažďovú vodu, zmiernovať následky mestských tepelných ostrovov a šetriť spotrebu energií pri vykurovaní alebo klimatizovaní budov. V tomto ohľade je najdôležitejšou časťou zelených striech vegetácia, ktorá je však závislá od vlastností rastového substrátu. Ten by mal tvoriť vhodné prostredie pre rast rastlín a zároveň byť dostatočne ľahký, aby nezaťažoval pôvodnú strešnú krytinu. Jednou z alternatívnych zložiek substrátov pre zelené strechy, ktorá by mohla pomôcť pri napĺňaní uvedených charakteristík je biouhlie.

Biouhlie je vďaka pórovitej štruktúre ľahkým materiálom, ktorý dokáže adsorbovať veľké množstvo vody a zabrániť vyplavovaniu rastlinných živín. Preto je aplikované do pôd s cieľom zlepšiť výnosnosť rastlín a podporiť ich rast. Avšak, aj napriek uvedeným benefitom, ktoré využitie biouhlia so sebou prináša, sa do strešných substrátov pridáva len výnimočne. Biouhlie sa pritom podľa viacerých štúdií javí ako trvalo udržateľný spôsob skvalitňovania vlastností substrátov pre zelené strechy.

Preto sa v predkladanej diplomovej práci zameriavame na charakterizáciu zelených striech, biouhlia a najmä benefitov, ktoré zelené strechy prinášajú svojmu okoliu s dôrazom na vplyv aplikácie biouhlia do extenzívnych strešných substrátov. V rámci experimentálnej časti porovnáme vlastnosti komerčného substrátu so substrátmi modifikovanými biouhlím z čistiarenských kalov v laboratórnych aj reálnych podmienkach.

1. Literárny prehľad

V súčasnosti sledujeme pomerne rýchly rozvoj miest, s ktorým úzko súvisí aj rozširovanie mestských plôch. Správa UNFPA (2016) naznačuje, že do roku 2030 bude v mestách žiť približne 5 miliárd ľudí, pričom už dnes mestá obýva viac ako polovica svetovej populácie. S výstavbou nepriepustných betónových či asfaltových plôch, ktoré nahrádzajú prirodzené zelené prostredie, prichádzajú environmentálne problémy vo forme celkového znečistenia ovzdušia a postupného otepľovania, ktoré je známe aj ako efekt mestského tepelného ostrova (Chen a kol., 2018b). Uvedené zmeny, ktoré so sebou prináša transformácia krajiny ovplyvňujú ľudské zdravie, lokálne klimatické podmienky a funkciu ekosystému (Imhoff a kol., 2010). Riešením uvedeného problému môže byť rozširovanie zelených plôch v mestských oblastiach. Zlepšenie mestskej mikroklimy sa dosahuje prostredníctvom vplyvu, ktorý majú rastliny na rovnováhu teploty a vlhkosti, zachytávania prachu a znečisťujúcich plynov z prostredia či regulácie prúdenia vzduchu. Zeleň v mestách zároveň prispieva k úsporám energií potrebných na ochladzovanie interiéru v letnom období (Castleton a kol., 2010; Georgi a Dimitriou, 2010).

Zelené strechy sa javia ako efektívna forma mestskej zelene, keďže až 32% z celkovej horizontálnej plochy v mestách môžu tvoriť strechy budov (Frazer, 2005). Vďaka estetickým, environmentálnym aj ekonomickým benefitom sa stávajú bežnou súčasťou mestskej architektúry či už nových alebo pôvodných zrekonštruovaných budov (Oberndorfer, 2007). Jednou z ďalších výrazných výhod zelených striech je regulácia množstva odtekajúcej dažďovej vody (Karczmarczyk a kol., 2018) a recyklácia odpadových materiálov používaných v rastových substrátoch (Bianchini a Hewage, 2012). Pozornosť sa venuje aj kvalite vody odtekajúcej z takýchto striech, nakoľko tieto obsahujú viacero vrstiev, ktoré môžu výrazne ovplyvňovať kvalitu vody. V tomto kontexte najdôležitejšiu úlohu zohráva rastový substrát (Liu a kol., 2020). Ten môže byť upravený aditívami, ktoré zlepšujú jeho fyzikálne, chemické a biologické vlastnosti, a tým pozitívne ovplyvňujú spomínané vlastnosti zelených striech (Chen a kol., 2021; Huang a kol., 2020). Podľa viacerých štúdií, ktoré v nasledujúcich kapitolách predstavíme, sa ako vhodné aditívum do strešných substrátov ukazuje pyrolýzne uhlie (biouhlie) pripravené termochemickou konverziou odpadovej biomasy alebo čistiarenských kalov.

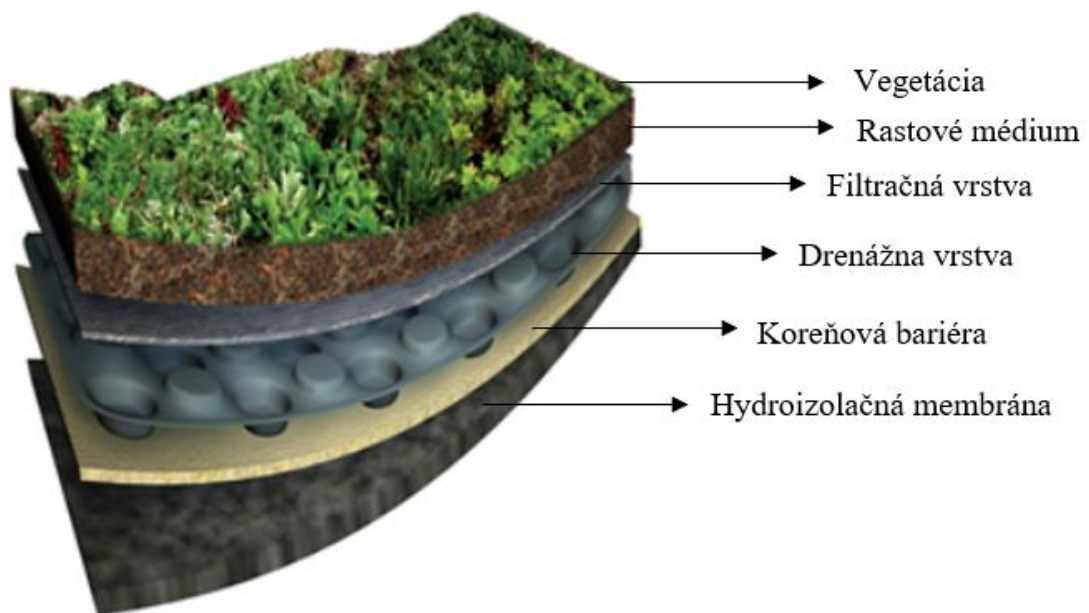
V uvedenom literárnom prehľade sa zameriame na extenzívne strešné substráty obohatené biouhlím, pričom dôraz kladieme na fyzikálno-chemické vlastnosti takto pripravených substrátov.

1.1. Konštrukcia zelených striech

Zelené strechy vo všeobecnosti rozdeľujeme na dva základné typy: intenzívne a extenzívne. Intenzívny systém zelenej strechy sa približuje strešným záhradám. Vďaka hlbšej vrstve substrátu umožňuje pestovanie vyšších stromov a vyžaduje pravidelnú starostlivosť.

Extenzívny typ sa viac prispôbuje hmotnostným obmedzeniam striech a je navrhnutý tak, aby vyžadoval minimálnu údržbu. Pozostáva z plytkého substrátu (výška vrstvy spravidla do 10 cm), čo postačuje na vytvorenie komplexného prostredia pre rast rastlín. Najčastejšie sa využívajú rastliny rodu *Sedum* (Molineux a kol., 2009). Extenzívnym modelom sa zaoberáme aj v ďalších častiach práce.

Zelené strechy sa skladajú z niekoľkých hlavných častí: koreňovej bariéry a vodeodolnej membrány, drenážnej vrstvy, filtračnej vrstvy prekrytej geotextíliou, a rastového substrátu s rastlinami (Obr. 1) (Hashemi a kol., 2015).



Obr. 1. Základné časti zelenej strechy (University of Maryland, 2021).

Hydroizolačná membrána, koreňová bariéra a filtračná vrstva sú časti, ktoré slúžia na ochranu samotnej strešnej krytiny alebo aj iných častí strechy. Drenážna vrstva okrem ochrannej úlohy tvorí hlavne systém na odvod prebytočnej vody zo substrátu. Umožňuje vytvoriť rovnováhu medzi vodou a vzduchom v substráte, a tým podporuje správny rast vegetácie. Zároveň vytvára rezervoár pre dažďovú vodu (Cascone, 2019). Z koreňových bariér sú dostupné dva typy, ktoré poskytujú fyzickú alebo chemickú bariéru. Fyzická

bariéra je tvorená tenkou vrstvou polymérnych materiálov, napr. LDPE (polyetylén s nízkou hustotou) a PP (polypropylén). Pri chemickej bariére sú využívané napríklad ióny medi, ktoré inhibujú prienik koreňov až na strešnú krytinu (Bianchini a Hewage, 2012). Vegetácia tvorí najvyššiu vrstvu zelenej strechy. V prípade extenzívnych zelených striech sú vhodné najmä rastliny rodu *Sedum*, ktoré sú schopné prežívať počas dlhých období sucha i na priamom slnku (Obr. 2), prežívajú taktiež v tieni a pri nízkych teplotách (Arabi a kol., 2015).



Obr. 2. Rastliny rodu *Sedum* na modeli zelenej strechy (Mobilane, 2021).

Substrát je najdôležitejšou vrstvou zelenej strechy, nakoľko od jeho zloženia a vlastností závisí úspešnosť vegetácie. Navyše plní dôležitú úlohu pri dosahovaní environmentálnych a ekonomických výhod, ktoré zelené strechy mestám ponúkajú. Z hľadiska produkcie substrátov je dôležitá lokálna dostupnosť surovín (Molineux a kol., 2009; Noya a kol., 2017). Tie by mali byť výsledkom recyklácie (za uplatnenia princípov cirkulárnej ekonomiky), čím sa zníži množstvo produkovaných odpadov. Nízka cena takýchto materiálov je výraznou ekonomickou výhodou pri konštrukcii zelených striech. Dodržaná však musí byť čo najnižšia ekotoxicita použitých surovín (FLL, 2018).

Extenzívny strešný substrát je zmesou organickej a anorganickej zložky v určitom pomere, ktorý vedie k dosiahnutiu čo najlepších vlastností daného substrátu. Dobrá absorpcia a prietok vody, vysoká pórovitosť, dostatočný obsah živín, nízka hmotnosť a dostatočná stabilita substrátu prispievajú k správne rastu vegetácie a minimálnej záťaži vytvárajúcej zelenou strechou na pôvodnú strešnú krytinu (Nagase a Dunnett, 2011). Na dosiahnutie vyššie spomenutých vlastností mnohí autori (Bollman a kol., 2019; Graceson a

kol., 2014; Nagasen a Dunnett, 2011; Vijayaraghavan a Raja, 2014) odporúčajú použiť menej ako 30% organickej hmoty. Tá je síce zdrojom živín pre rastliny, ale postupne podlieha rozkladu a podporuje rast nežiadúcej vegetácie (napr. burín). V tabuľke 1 sú uvedené zmesi materiálov bežne používané pri produkcii strešných substrátov.

Tab. 1. Materiály používané pre extenzívne strešné substráty.

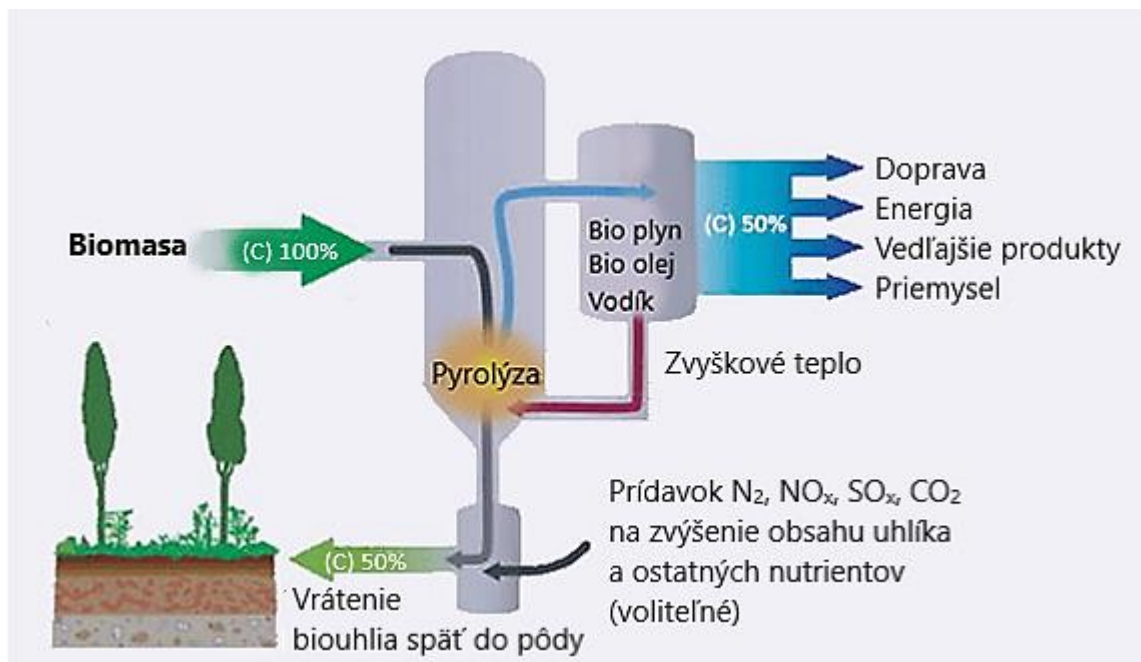
Anorganická zložka	Organická zložka	Zdroj
Vermikulit, perlit, drvené tehly, piesok	Kokosová rašelina	Vijayaraghavan a Raja, 2014
Expandovaná bridlica, piesok	Rašelina, kompost z kuracieho hnoja	Rowe a kol., 2006
Drvená tehla	Rastlinný kompost	Nagase a Dunnett, 2011
Expandovaný íl, piesok, vermikulit, perlit	Karbonizované ryžové šupky, drvená borovicová kôra, rašelina, kurací hnoj, piliny, kompost, kostná múčka, ihličie, kokosové vlákna	Noya a kol., 2017
Drvená tehla a škridla	Rastlinný kompost	Graceson a kol., 2014
Perlit, vermikulit, pemza, červená škvara, piesok	Rašelina na báze machu	Bollman a kol., 2019

Na zvýšenie obsahu vody v substráte boli použité aditíva, ktoré zlepšujú fyzikálne a chemické charakteristiky substrátu a zároveň výrazne nezvyšujú hmotnosť zelenej strechy, nepoškodzujú drenážnu vrstvu a neznižujú životnosť zelenej strechy (Cao a kol., 2014). Biouhlie alebo superabsorpčné polyméry na báze kremičitanov zvyšujú kapilárnu vodnú kapacitu rastového média, zvyšujú množstvo vody dostupnej pre rastliny a pozitívne ovplyvňujú produkciu biomasy (Chen a kol., 2018a; Farrell a kol., 2013) a pH substrátov. Výsledky tiež naznačujú, že kontaminujúce prvky prípadne obsiahnuté v uvedených materiáloch (napr. ťažké kovy) sú imobilizované a tak nedostupné pre koreňový systém rastlín (Frišták a kol., 2018; Krawczyk a kol., 2017). Na zvýšenie obsahu vody v substráte a množstva vody dostupnej pre rastliny sa využívajú aj hydrogély. Avšak, ich aplikáciou nedochádza k zmene času vädnutia rastlín a nemá vplyv na množstvo produkovanej biomasy (Farrell a kol., 2013; Jobin, 2004). V ďalšej časti upriamime pozornosť práve na biouhlie a jeho vplyv na vlastnosti extenzívnych strešných substrátov.

1.2. Biouhlie

Biouhlie je materiál bohatý na uhlík, ktorý vzniká ako pevný produkt pyrolýzy biomasy. Pyrolýza je najbežnejšou metódou výroby biouhlia, kedy je organická hmota (napr.

odpadová rastlinná biomasa) termochemicky upravovaná v podmienkach s nízkym alebo žiadnym prístupom kyslíka (Deem a Crow, 2017; Wang a Wang, 2019; Weber a Quicker, 2018). Okrem biouhlia sú produktami pyrolýzy aj syntézny plyn a bioolej, ktoré môžu byť využité na produkciu elektrickej energie alebo biopalív. V menšom množstve vznikajú počas pyrolýzy aj rôzne vedľajšie produkty, ktoré sú tiež využité napríklad na ošetrovanie dreva, výrobu lepidiel, konzervantov, dochucovadiel a ďalších chemických zlúčenín (Lehmann, 2007). Ich produkcia závisí od podmienok pyrolýzy. Na základe teploty a dĺžky pyrolýzy rozlišujeme pomalú a rýchlu pyrolýzu. Pri pomalej pyrolýze (Obr. 3) je materiál vystavený nižším teplotám (okolo 500°C) pomerne dlhý čas (niekoľko hodín). Proces rýchlej pyrolýzy je naopak charakteristický vysokou teplotou, ktorá na biomasu pôsobí veľmi krátky čas (spravidla len niekoľko sekúnd). Hlavné rozdiely medzi týmito metódami sú v množstve produkovaného biouhlia. Pri rýchlej pyrolýze vzniká najmä bioolej, naopak pomalá pyrolýza vedie k vyššej produkcii biouhlia (Qian a kol., 2015).



Obr. 3. Schéma nízko-teplotnej pyrolýzy spolu so vznikajúcimi produktami (upravené podľa Lehmann, 2007).

Okrem podmienok pyrolýzy ovplyvňuje fyzikálno-chemické vlastnosti vzniknutého produktu aj vstupná surovina (Spokas a kol., 2012). Biouhlie sa vyrába zo širokej škály zväčša odpadovej biomasy rastlinného i živočíšneho pôvodu, ktorá zahŕňa napríklad tvrdé drevo, orechové škrupiny, kukuričné oklasky, slamu, kôru, zelený záhradný odpad, papierenský a čistiarenský kal, kravský alebo konský hnoj, hydínový trus a pod. (Deem a

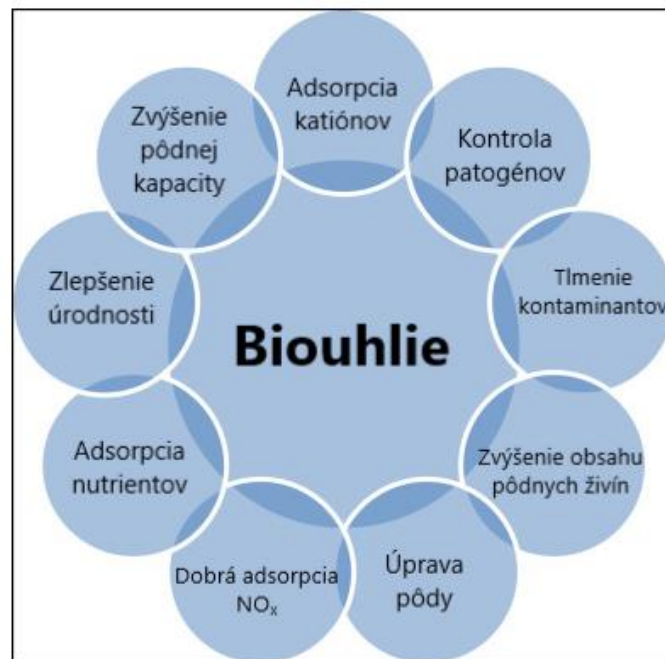
Crow, 2017). Každá z uvedených surovín vyžaduje iné podmienky pyrolýzy či dobu zdržania. To potom ovplyvňuje najmä veľkosť povrchu, pórovitosť a zastúpenie funkčných skupín na povrchoch biouhlia, čím sa v konečnom dôsledku menia jeho aplikačné vlastnosti (Oni a kol., 2019). Napríklad rastlinná biomasa sa skladá najmä z celulózy, hemicelulózy a lignínu. Hemicelulóza sa rozkladá pri teplotách 220 – 315 °C. Celulóza je tepelne stabilnejšia a rozkladá sa v rozmedzí teplôt 280 – 400 °C. Na rozklad lignínu sú využívané teploty pyrolýzy v širšom teplotnom rozsahu, pričom niekedy je potrebná aj pyrolýza pri 900 °C. Tieto zložky sa pri tepelnom spracovaní správajú odlišne, a preto v konečnom dôsledku ovplyvňujú vlastnosti produktu (Yang a kol., 2007). Biouhlie získané zo živočíšnych materiálov má vo všeobecnosti nižší špecifický povrch pórov v porovnaní biouhlím na báze rastlinnej biomasy (Singh a kol., 2012).

Biouhlie po pyrolýze získava aj ďalšie jedinečné vlastnosti, ako vysoký obsah uhlíka či chemickú a biologickú stabilitu (Das a kol., 2020). Vďaka svojim vlastnostiam je využívané v rôznych oblastiach. Biouhlie s vysokou elektrickou vodivosťou, pórovitosťou a stabilitou pri nízkych teplotách je využívané ako materiál pri výrobe elektród v mikrobiálnych palivových článkoch (Huggins a kol., 2014). Biouhlie vďaka mikroporéznej štruktúre a funkčným skupinám s obsahom kyslíka poskytuje širšie využitie pri čistení kontaminovaných vôd (Hong a kol., 2020). Využíva sa ako adsorbent anorganických (ióny kovov) a organických (farbivá, fenoly pesticídy, polycyklické aromatické uhľovodíky) látok (Mohan a kol., 2014). Účinne pôsobí aj ako filter na odstraňovanie nedegradovateľných liečiv z odpadových vôd. V testoch vykazuje rovnakú účinnosť ako pieskové filtre, ale s objemovou hustotou na úrovni desatiny hustoty pieskového filtra (Dalahmeh a kol., 2018). Najčastejšie je však využívané ako pôdne aditívum dôležité pre zvýšenie kvality pôdy (Obr. 3) (Deem a Crow, 2017).

Zásadnú úlohu pri udržiavaní kvality pôdy zohráva obsah organického uhlíka v pôde, čím sa podporuje produktivita a odolnosť rastlín (Lal, 2010). Vo všeobecnosti má biouhlie z drevných materiálov najvyšší obsah uhlíka spolu s vysokým obsahom dusíka, ktorý sa výrazne nemení ani vplyvom teploty pyrolýzy. Biouhlie získané z hnoja zas obsahuje vyššie koncentrácie P, Ca, Mg, N a K (Xie a kol., 2015). Uhlie pripravené z kalov z čističiek odpadových vôd vykazuje vysoký obsah dusíka, fosforu a iných mikronutrientov (Hossain a kol., 2011).

Nedostatok stabilizujúcich minerálov v pôde spôsobuje, že aplikácia bežných hnojív je účinná iba na krátku dobu (Glaser a kol., 2001). Jednorazová aplikácia biouhlia pritom môže zvýšiť úrodnosť rastlín až na 4 roky (Major a kol., 2010). Biouhlie je v pôde

rezistentné voči biotickej aj abiotickej degradácii (Leng a kol., 2019) a javí sa ako pomerne stabilné pôdne aditívum aj v oblastiach, kde dochádza vplyvom vysokých teplôt a intenzívnych zrážok ku rýchlej degradácii organickej hmoty. Rovnako aj veľký funkčný povrch a vysoká pórovitosť biouhlia môže zvýšiť obsah pôdnej vody, kationovú výmennú kapacitu pôdy a zlepšiť odolnosť rastlín voči chorobám (Das a kol., 2020). Na obrázku 4 sú uvedené niektoré benefity aplikácie biouhlia nielen do poľnohospodárskych pôd.



Obr. 4. Benefity po aplikácii biouhlia do pôdy (upravené podľa Oni a kol., 2019).

Biouhlie sa preto stáva kľúčovým materiálom v manažmente ochrany životného prostredia. Navyše, vďaka jeho využívaniu sa môžu spustiť postupy vedúce k recyklácii viacerých materiálov a optimalizácii toku živín a energie (Schmidt a Wilson, 2014). Novou možnosťou v oblasti ďalšieho využitia biouhlia je jeho aplikácia do substrátov pre zelené strechy. Hlavným zámerom je prídavkom biouhlia ovplyvniť množstvo zadržanej vody v substráte, objemovú hmotnosť substrátu, prežívanie vegetácie, množstvo vyprodukovanej biomasy, kvalitu odtekajúcej dažďovej vody a množstvo vody, ktoré je prístupné rastlinám (Cao a kol., 2014; Qianqian a kol., 2019). Aplikáciou biouhlia tak môžeme podporiť výhody zelených striech, ktoré sú hlavným dôvodom ich zakladania v mestských oblastiach (Francis a Jensen, 2017).

1.3. Vodozadržná kapacita zelených striech

Zelené strechy sú známe schopnosťou redukovať množstvo odtekajúcej dažďovej vody, čím sa znižuje pravdepodobnosť vzniku záplav najmä po privalových zrážkach

(Teemusk a Mander, 2007; Zheng a kol., 2021). Podstatou tohto efektu je absorpcia vody najmä substrátom ale aj inými časťami zelených striech, v dôsledku čoho sa: (a) zníži celkový objem odtekajúcej dažďovej vody, (b) oneskorí počiatočný čas odtoku a (c) predĺži postupné uvoľňovanie prebytočnej dažďovej vody (Mentens a kol., 2006). Redukcia odtoku vody zo zelených striech je výrazne ovplyvňovaná aj procesom evapotranspirácie.

1.3.1. Vplyv substrátu na vodozadržnú kapacitu extenzívnych zelených striech

Substráty zelených striech zadržia 80-90% z celkových retenčných kapacít zelených striech (Mentens a kol., 2006). Redukcia odtoku dažďovej vody prostredníctvom strešných substrátov je ovplyvnená mnohými faktormi. Jedným z nich je napríklad počasie. Ak sa substrát po častých zrážkach nestihne zregenerovať, nedokáže zadržať vodu po silných búrkach (Moran a kol., 2003). Tento jav potvrdili aj Bliss a kol. (2009), ktorý merali odtok vody z extenzívnej zelenej strechy a tradičnej nepriepustnej strechy. Počas dažďa (0,5 mm/h) pozorovali v prvej hodine o 88% nižší prietok zo zelenej strechy ako z konvenčnej. V priebehu 10 h sa prietok z oboch striech vyrovnal. Avšak, aj napriek postupnému nasýteniu substrátu a vyrovnaniu prietokov, v konečnom dôsledku, zelená strecha znížila hodnotu maximálneho prietoku o 29% a redukovala množstvo odtekajúcej zrážkovej vody o 19%. Zároveň potvrdili aj dlhší čas odtoku dažďovej vody zo zelenej strechy v porovnaní s tradičnou strechou, kedy bol pozorovaný rozdiel až 5 hodín. Nawaz a kol. (2015) uvádzajú celkovú redukciu odtekajúcich zrážkových vôd extenzívnymi strechami o 57% a pri intenzívnych zelených strechách z dôvodu hlbšieho substrátu až o 60 – 95% (Beecham a Razzaghmanesh, 2015). Rozdiel v množstve zadržanej vody substrátom je viditeľný aj pri porovnaní extenzívnych zelených striech s rôznou výškou substrátu. Rastové médium s výškou 6 – 10 cm môže zachytiť asi 45% dažďovej vody a vo vegetačnom období až 60%. Tieto hodnoty klesajú približne na 40% pri substrátoch s výškou 2 – 4 cm (Van Seters a kol., 2009).

Zvýšenú retenciu zrážok vykazujú aj substráty s vyšším podielom organického materiálu, pričom nárast organickej hmoty z 5% na 15% môže predĺžiť čas odtoku zo zelených striech o 6 minút. Ešte výraznejší rozdiel bol zaznamenaný medzi čisto anorganickým substrátom a substrátom s prídavkom 5% organickej hmoty. Pri anorganickom substráte je čas zdržania odtoku 4 minúty a po pridaní organického podielu stúpa na 20 minút (Yio a kol., 2013). De-Ville a kol. (2017) poukázali aj na vplyv starnutia substrátu v súvislosti so zadržanou dažďovou vodou. Substráty po 5 rokoch vykazovali maximálnu kapilárnu vodnú kapacitu vyššiu o 7% percent oproti novým strechám

s čerstvým substrátom. Autori však uvedený jav sledovali hlavne v substrátoch z keramzitu a len okrajovo v substrátoch z drvených tehál (Obr. 5). Vysvetlením by mohla byť veľkosť pórov častíc substrátu, ktorá sa časom mení. Vlhkosť je zadržovaná najmä mikropórmi s veľkosťou menšou ako 50 μm , pričom Latshaw a kol. (2009) uvádzajú veľkosť mikropórov menej ako 10 μm . V dôsledku celkového zmenšovania častíc a prítomnosti koreňov sú postupom času mikropóry v substráte zastúpené častejšie, čo zvyšuje jeho vodozadržnú kapacitu (De-Ville a kol., 2017). V substráte sú tiež zastúpené makropóry, ktoré umožňujú pomerne rýchle odvodnenie substrátu. Množstvo vody zadržanej substrátom zvyšujú aj zeolity, hydrogély alebo biouhlie, tak ako už bolo spomenuté vyššie.

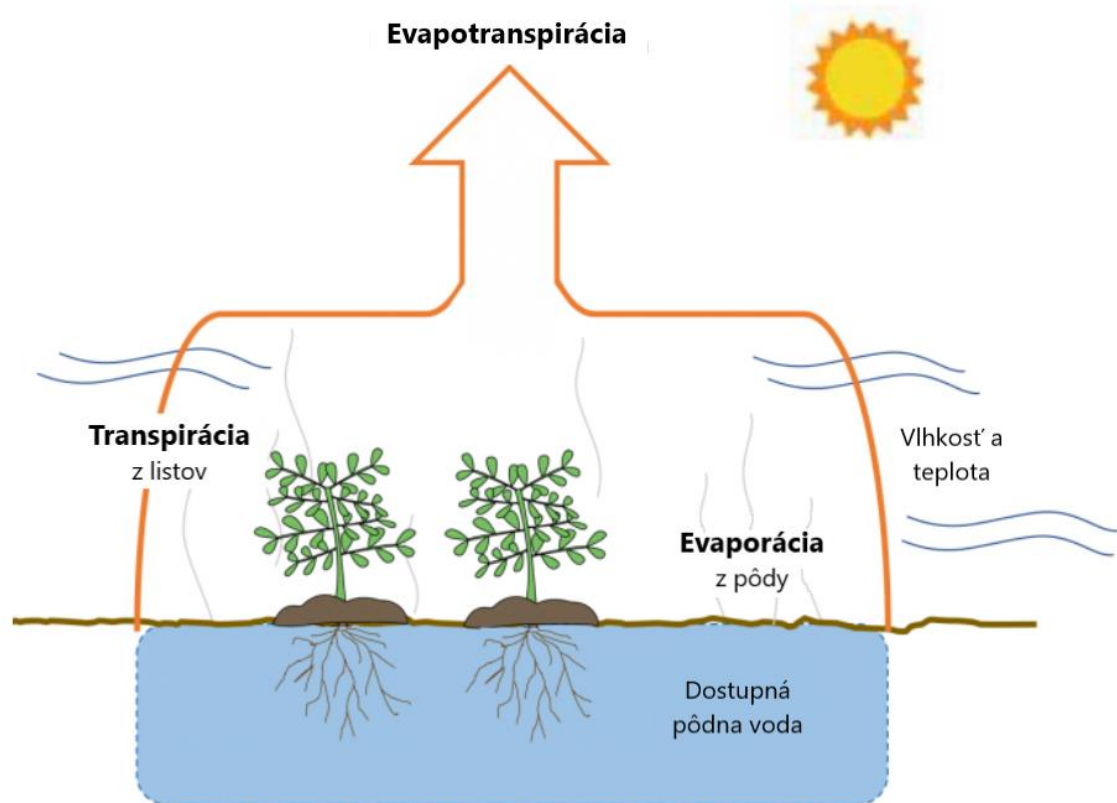


Obr. 5. Porovnanie materiálov používaných pre rastové substráty, A – keramzit (Rivashaa Eco Design Solutions Pvt Ltd, 2021), B – drvené tehly (ASQ Garden and Landscape, 2021).

1.3.2. Evapotranspirácia

Evapotranspirácia (Obr. 6) je kombináciou transpirácie, čiže vody transpirovanej rastlinami alebo zadržanej v rastlinnom pletive a evaporácie, ktorá prebieha počas vyparovania vody z povrchu pôdy a rastlín. Transpirácia pritom zahŕňa aj proces gutácie, kedy rastlina stráca vodu v tekutej forme primárne cez prieduchy nepoškodeného listu alebo stonky (Cascone a kol., 2018). Vývoj vegetácie má výrazný vplyv na efekt evapotranspirácie. Pokiaľ sú rastliny malé prevažuje evaporácia z pôdy. S vývinom rastlín sa spotreba vody zvyšuje a pri vytvorení súvislého rastlinného porastu prevažuje transpirácia. Z experimentov je zrejmé, že substrát s vysadenou vegetáciou vykazuje vyššiu retenciu zrážok v porovnaní s nezeleným substrátom asi o 27% (Stovin a kol., 2015). Komplexná evapotranspirácia je tak v porovnaní s jednoduchou evaporáciou výrazne efektívnejšia (Sanchez a Reames, 2019). Prezentovaný priebeh evapotranspirácie zároveň

napomáha aj pri zmiernovaní efektu mestského tepelného ostrova (Sanchez a Reames, 2019). Avšak, evapotranspirácia má dynamický charakter, preto nesúvisí iba s rastlinami a rastovým médiom, ale aj s lokálnou klímou (Tab. 2).



Obr. 6. Schéma evapotranspirácie (prevzaté zo SERC, 2021).

Tab. 2. Klimatologické a strešné parametre ovplyvňujúce proces evapotranspirácie (upravené podľa Cascone a kol., 2018).

Klíma	Vegetácia	Substrát	Ošetrovanie
Slnčné žiarenie a ročné obdobie	Stupeň tienenia	Obsah vody	Režim zavlažovania
Teplota a vlhkosť vzduchu	Stupeň vývinu rastlín	Charakteristika substrátu	Kultivácia substrátu
Rýchlosť vetra a zrážky	Vlastnosti vegetácie	-	Ošetrovanie rastlín

Evapotranspiráciu môžeme vyjadriť ako vrstvu vyparenej vody (mm.deň^{-1}), pričom rozlišujeme potenciálnu a aktuálnu evapotranspiráciu. Potenciálna predstavuje maximálny výpar za predpokladu neobmedzeného prísunu vody. Aktuálna je reálne množstvo odparenej vody (Hanzlíková, 2018).

Pre výpočet potencionálnej evapotranspirácie sa využíva niekoľko vzťahov. Napríklad Penman-Monteithov model (1), ktorý je komplexnejší ako ostatné ďalej prezentované modely. Bol vytvorený pre výpočet evapotranspirácie z voľnej vodnej hladiny alebo holej či trávinatej plochy. Ukazuje sa ako konzistentný s reálne nameranými údajmi, ale je dátovo náročný (Cristea a kol., 2013, Petreje, 2021).

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

kde:

ET_o – Penman-Monteithova potencionálna evapotranspirácia (mm deň⁻¹)

T – priemerná denná teplota vzduchu vo výške 2 m nad povrchom (°C)

U – priemerná denná rýchlosť vetra vo výške 2 m nad povrchom (m s⁻¹)

e_s – tlak nasýtených pár počítaný ako priemer tlakov nasýtených pár pri maximálnej a minimálnej teplote vzduchu (kPa)

e_a – skutočný priemerný denný tlak pár vo výške 2 m nad povrchom (kPa)

Δ – sklon krivky tlaku pár (kPa°C⁻¹)

γ – psychrometrická konštanta (kPa°C⁻¹)

R_n – čisté priemerné denné žiarenie dopadajúce na povrch (MJm⁻² deň⁻¹) (Cristea a kol., 2013, Petreje, 2021).

Hodnoty R_n vypočítame podľa vzťahu (2):

$$R_n = Short_{up} - Short_{down} + Long_{up} - Long_{down} \quad (2)$$

pričom:

$Short_{up}$ a $Short_{down}$ – krátkovlnné dopadajúce a odrazené žiarenie

$Long_{up}$ a $Long_{down}$ – dlhovlnné dopadajúce a odrazené žiarenie.

Kvôli jednoduchšej štruktúre a menej náročným požiadavkám na údaje sa stávajú zaujímavejšími vzťahy Priestley-Taylor (3) a Makkink-Hansena (4) (odvodené od modelu Penman-Monteitha), a to najmä v prípade práce s obmedzenými informáciami. V štúdiách však vykazujú rôznu efektivitu (Cristea a kol., 2013).

$$ET_{OPT} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \quad (3)$$

kde:

ET_{oPT} – Priestley-Taylorova potenciónálna evapotranspirácia (mm deň⁻¹)

α – 1,26 (Priestley-Taylorov koeficient evaporácie)

λ – merné skupenské teplo (entalpia) varu (2.45 MJ kg⁻¹)

Δ, γ, R_n – rovnaké ako vo vzorci Penman-Monteitha.

$$ET_{oMK-Ha} = C \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} \quad (4)$$

kde:

ET_{oMK-Ha} – Makkink-Hansenova potenciónálna evapotranspirácia (mm deň⁻¹)

C – 0,7 (koeficient vyparovania navrhnutý Hensenom)

R_s – priemerné denné slnečné žiarenie (MJ m⁻² deň⁻¹)

Δ, γ, R_n – rovnaké ako vo vzorci Penman-Monteitha (Cristea a kol., 2013).

Turcova rovnica (5) je využitelná len na trávnatých plochách a v prípade, že priemerné denné teploty neklesajú pod 0°C. Rovnica tak výpočet zjednodušuje a preto môžeme vo výsledku predpokladať nepresnosti (Petreje, 2021).

$$ET = 0,013 \frac{T}{T+15} (Q + 50) \quad (5)$$

pričom:

ET – Turcova potenciónálna evapotranspirácia (cm deň⁻¹)

T – priemerná denná teplota vzduchu (°C)

Q – priemerná denná intenzita krátkovlnného žiarenia (MJ m⁻² deň⁻¹).

1.3.3. Vplyv biouhlia na vodozadržnú kapacitu extenzívnych strešných substrátov

Ako sme už uviedli v predchádzajúcich kapitolách, zelené strechy sa stávajú účinným nástrojom pri znižovaní odtoku dažďovej vody v mestách. Avšak veľkou prekážkou pri ich implementácii v mestách je ich značná hmotnosť, pričom najväčšiu záťaž na strešnú krytinu vytvára práve rastový substrát. Preto sú žiadúce ľahké substráty, ktoré sa zároveň vyznačujú vysokou schopnosťou retencie vody (Werdin a kol., 2021).

Prídavok biouhlia do extenzívnych strešných substrátov podporuje zvyšovanie množstva vody zadržanej substrátom a pritom celkovo znižuje jeho objemovú hmotnosť. Tento jav je spôsobený vďaka vysokej vnútornej pórovitosti a veľkému sorpčnému povrchu

biouhlia (Ma a kol., 2016). Cao a kol. (2014) sledovali pri prídavku 30% (v/v) zníženie objemovej hmotnosti o 2% a rovnako Revell (2012) uvádza zníženie o 4% pri prídavku biouhlia 0,5 až 2,5% (w/w). V štúdiách, ktoré sa zamerali na množstvo zadržanej vody substrátmi obohatenými o biouhlie (Beck a kol., 2011; Gan a kol., 2021; Hussain a Ravi, 2021) prezentujú autori zvýšenie schopnosti retencie zrážok inovovanými substrátmi. Z porovnania uvedených štúdií je však zrejmé, že zadržiavanie vody substrátom obohateným o biouhlie ovplyvňuje jednak samotné biouhlie (vstupná surovina, aplikačná dávka) a rovnako typ použitého substrátu (Tab. 3) (Huang a kol., 2020).

Tab. 3. Prehľad surovín použitých na produkciu biouhlia, prípravu strešného substrátu a ich vplyv na retenciu vody pri prídavku biouhlia v množstve 5-10%.

Zdroj	Zloženie substrátu	Suroviny na výrobu biouhlia	Pozorované zvýšenie retencie vody
Beck a kol., 2011	Mix štrku, piesku, bahna, ílu, pemzy, kompostu a buničiny	70% z ryžových šupiek, orechových a kokosových škrupín a 30% z pneumatík	4,4%
Gan a kol., 2021	Ílovitá pôda	Ryžová slama	13%
Hussain a Ravi, 2021	Piesok	Drevo zo stromov rodu <i>Prosopis</i>	20-30%

Naopak Qianqian a kol. (2019) nepozorovali po aplikácii biouhlia významný rozdiel v množstve zadržanej vody v porovnaní s bežne používaným komerčným substrátom. Kuoppamäki a kol. (2016) prezentujú rovnaký výsledok, ale iba v prípade laboratórnych testov, kedy nebol pozorovaný výrazný rozdiel medzi substrátom bez a s biouhlím. Avšak, pri testoch v reálnych podmienkach pozorovali vplyv biouhlia na retenciu dažďovej vody. Tento efekt ovplyvňovalo počasie, rovnako ako je to vo všeobecnosti pozorované pri zelených strechách. Preto pri častých a výdatných zrážkach nebol vplyv biouhlia tak výrazný. Zaujímavé sú aj experimenty porovnávajúce množstvo zadržanej vody v substráte v závislosti od uloženia biouhlia. Pri jeho aplikácii na povrch substrátu klesol objem zadržanej zrážkovej vody o 5% v porovnaní so substrátom, v ktorom bola vrstva biouhlia aplikovaná 2 cm pod povrch (Kuoppamäki a kol., 2016). Vplyv biouhlia na objem zadržanej vody sa pritom mení aj s vekom použitého uhlia. Bolo dokázané, že pyrolýzne uhlie vykazuje lepšiu retenciu vody po troch rokoch od aplikácie v porovnaní s čerstvým

biouhlím. Tento jav je pravdepodobne spôsobený mechanickým poškodením biouhlia počas expozície v dôsledku zmrazovania a rozmrazovania substrátu. To vedie k vzniku menších fragmentov, ktoré zvyšujú konektivitu pórov biouhlia (Paetsch a kol., 2018).

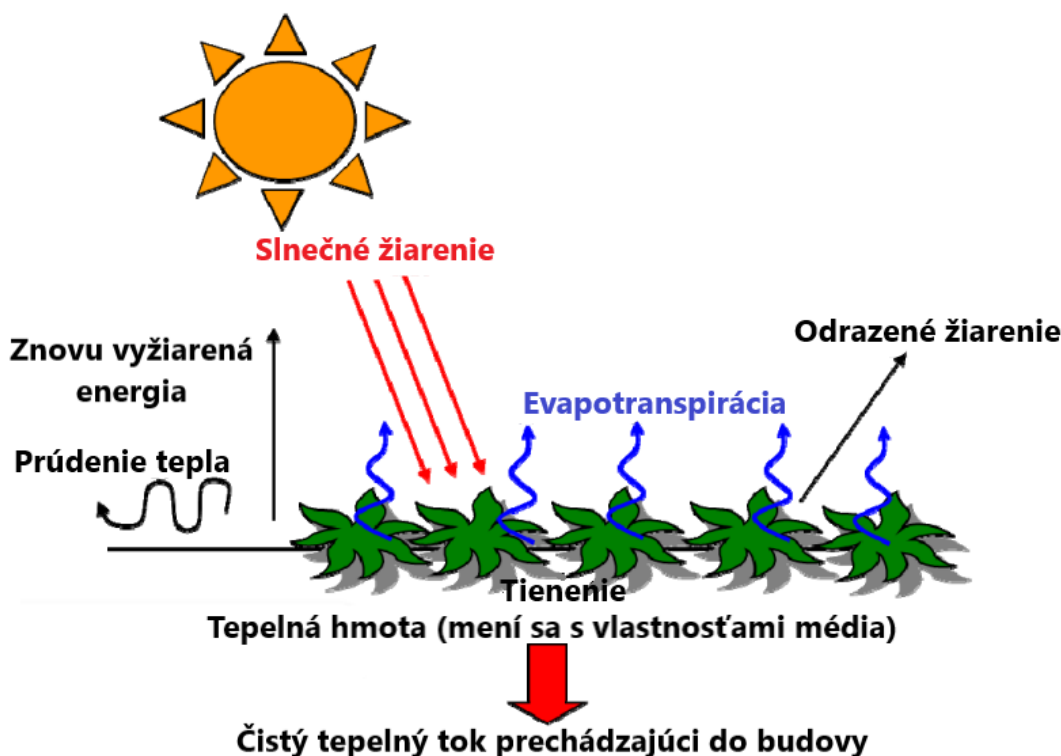
Efekt uvedených sezónnych vplyvov pozorujeme aj v samotnom substráte, kedy množstvo zadržanej vody ovplyvňujú aj trhliny vznikajúce v médiu počas striedania suchých a daždivých období alebo rovnako počas zmrazovania a rozmrazovania rastového substrátu. Sezónne kolísanie teploty spôsobuje nerovnomerné rozloženie vlhkosti v substráte a zároveň aj vznik miest s rôznou teplotou substrátu. Následné odparovanie vody z rastového média vedie k vzniku trhlín a prasklín. Uvedený jav možno minimalizovať aplikáciou biouhlia, ktoré môže vďaka povrchovým funkčným skupinám zlepšiť interakciu pôdných častíc prostredníctvom chemických väzieb či van der Waalsových síl. Tým znižuje priepustnosť dažďovej vody substrátom. Uvedený jav je výraznejší po zvýšení obsahu biouhlia v médiu alebo pri aplikácii rastlinného biouhlia namiesto živočíšneho (Gan a kol., 2021; Wani a kol., 2021). Werdin a kol. (2021) pozorovali výraznejšie zvýšenie obsahu vody zadržanej v rastovom médiu, pri použití jemného biouhlia. To ale naopak znižovalo obsah pôdneho vzduchu, čo nakoniec môže spôsobiť zmáčanie média. Preto takto upravený substrát vyžaduje časté kontroly hlavne v oblastiach s vyšším percentom zrážkových udalostí. Hrubšie biouhlie má miernejší vplyv na množstvo zadržanej vody substrátom, ale umožňuje dobré prevzdušnenie substrátu, čím zabezpečuje drenáž, ktorá je dôležitá pre správny vývin rastlín.

1.4. Vegetácia extenzívnych zelených striech

Zdravá vegetácia je nevyhnutná pre dosiahnutie benefitov zelených striech, ktoré pomáhajú zmierňovať efekt urbanizácie v mestách. Vegetácia znižuje teplotu povrchu budov odvádzaním latentného tepla prostredníctvom transpirácie, evaporácie (vid'. 1.3.2) a vytváraním tieňa na danej ploche (Obr. 7) (Clark a kol., 2010). Úspešnosť vegetácie závisí najmä od výberu vhodných rastlinných druhov, ktoré sú schopné prežiť v podmienkach danej zelenej strechy a najmä strešného substrátu (Bousselot a kol., 2011). Tenká vrstva substrátu vytvára zníženú zakoreňovaciu zónu pre rastliny. Rovnako obmedzuje objem vody, ktorý môže byť strechami zadržaný po dažďoch. Rastliny tak musia prekonať extrémne teplotné rozmedzie, priame slnečné žiarenie alebo silný vietor. To vytvára na strechách systém v mnohých ohľadoch podobný púštym podmienkam i keď často ide o mestá s konzistentným objemom zrážok. Preto sú na strechách vysádzané najmä sukulentné monokultúry rastlín rodu *Sedum*, ktoré dlhodobo vykazujú najvyššiu úspešnosť

v prostredí extenzívnych zelených striech (Griffin a kol., 2017). Výhodou je CAM metabolizmus, ktorý rastlinám umožňuje fixovať CO₂ v noci a počas dňa šetriť vodu (Arabi a kol., 2015).

Avšak, z pozorovaní pestovania monokultúrnych plodín je známe, že monokultúrne systémy môžu mať výrazné problémy so škodcami. Preto by sa paleta vysádzaných druhov mala rozšíriť, čím by sa zároveň mohol zefektívniť proces chladenia budov so založenými zelenými strechami (Bousselot a kol., 2011). Výber rastlinných druhov je tiež ovplyvnený zložením samotného rastového média. Vegetácia zelených striech je tak priamo závislá od substrátu, ktorý im poskytuje vodu, živiny a oporu (Sandoval a kol., 2015).



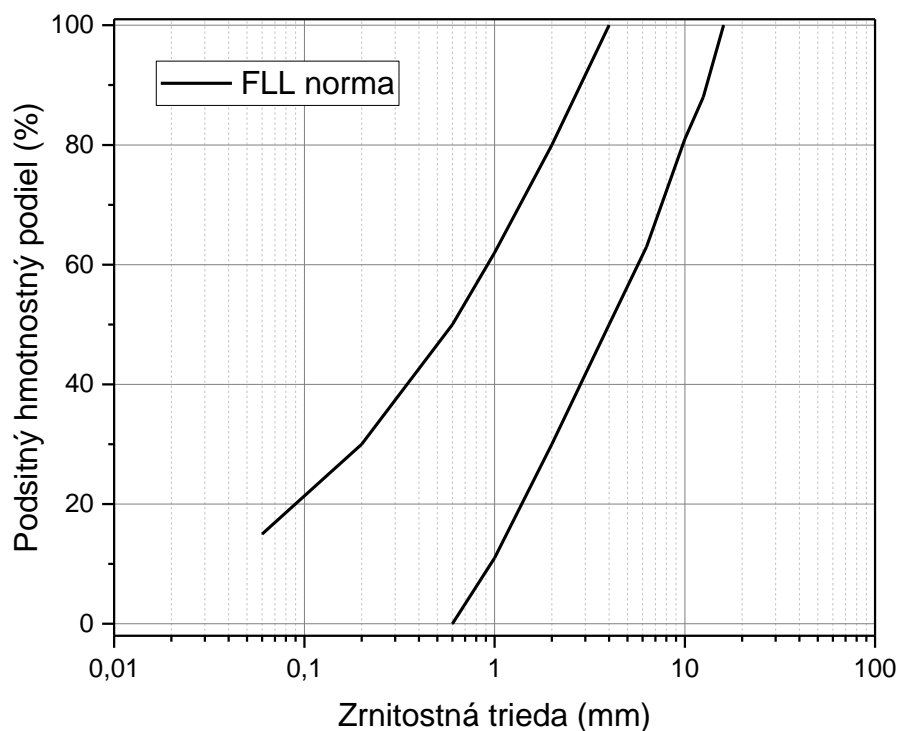
Obr. 7. Energetická bilancia zelených striech (prevzaté od Clark a kol., 2010).

1.4.1. Vplyv extenzívneho strešného substrátu na vegetáciu

Podiel vzduchu a vody v substráte je dôležitý pre rast, vývoj a prežitie rastlín. Preto je v tomto ohľade najdôležitejším fyzikálnym parametrom substrátu distribúcia častíc rôznej veľkosti, ktorá určuje množstvo vody, ktoré substrát dokáže zadržať adhéznymi a kohéznymi silami. Veľkosť častíc tiež určuje pórovitosť substrátu, teda prázdny priestor vytvorený časticami substrátu. V substráte s primárnym zastúpením veľkých častíc sa nachádzajú veľké póry, cez ktoré voda preteká rýchlo a väčšina pórov je vyplnená vzduchom. Naopak substrát s veľkým množstvom malých častíc vytvára malé póry, ktoré

efektívnejšie zadržiavajú vodu (vid'. 1.3.1.) (Griffin, 2014). Substráty by mali pozostávať z malých aj veľkých častíc, pretože priestory medzi nimi sú významné pre rast koreňov, rozvoj mikrobiálnej populácie, cirkuláciu vzduchu a priesak vody. V ideálnom prípade by obsah pórov v médiu mal predstavovať 50%, pričom polovicu z tejto časti má tvoriť voda a polovicu vzduch. Ak je vody veľa substrát je ťažký a premočený. Naopak pri vyššom obsahu vzduchu rastlinám voda chýba a vysychajú (Latshaw a kol., 2009).

Veľkosť častíc pre všetky typy substrátov preto určuje FLL (2018) a závisí najmä od hĺbky daného substrátu. Vo všeobecnosti by pri sypkých materiáloch frakcia s veľkosťou 0,063 mm nemala prekročiť množstvo 10%. Distribúcia veľkosti častíc viacvrstvových extenzívnych strešných substrátov by podľa FLL (2018) mala spadať medzi dve distribučné krivky ako ich ukazuje Obr. 8.



Obr. 8. Graf distribúcie veľkosti častíc pre viacvrstvové extenzívne strešné substráty (FLL, 2018).

Obsah organickej zložky v rastovom médiu má tiež výrazný vplyv na rast a prežitie vegetácie zelených striech. Organická hmota tiež podporuje zadržiavanie vody v substráte, ale hlavne je zdrojom živín pre rastliny a prispieva ku zvýšeniu kationovej výmennej kapacity substrátu, čím podporuje produkciu biomasy a druhovú rozmanitosť rastlín. Avšak, bujný rast vegetácie nie je na zelených strechách vždy žiadúci, pretože môže viesť k zníženiu tolerance rastlín na sucho (Bates a kol., 2013; Griffin a kol., 2017; Nagase a Dunnett, 2011).

Podľa Young a kol. (2014) kompost v substráte zvyšuje rast výhonkov o 32% a koreňov o 13%. Zároveň zvyšuje koncentráciu dusíka vo výhonkoch o 20% a chlorofylu až o 57%. Rozklad organickej hmoty však zároveň spôsobuje zhutnenie média, čím sa spomaľuje infiltrácia vody do substrátu, čo jednak zvyšuje povrchový odtok a tiež znižuje množstvo vody dostupnej rastlinám. Hutné a tvrdé rastové médium neobsahuje dostatok vzduchu potrebného pre korene rastlín a už samotné prenikanie koreňov substrátom je náročné. V dôsledku toho dochádza k poškodeniu koreňov a rastliny majú malé a pomaly rastúce listy (Passioura, 2002).

Jedným z ďalších významných faktorov ovplyvňujúcich rast a diverzitu rastlín je hĺbka rastového média. Z pozorovaní vyplýva, že s väčšou hĺbkou rastového substrátu rastie produkcia, životnosť a druhová rozmanitosť rastlín (Olly a kol., 2011). Zároveň sa vegetácia ľahšie prispôsobuje obdobiam sucha. Tento jav je pravdepodobne spojený s už spomínaným vyšším obsahom vody v hlbšom substráte (VanWoert a kol., 2005a). Vyššie rastové médium je taktiež odolnejšie voči nižším teplotám a zamrznutiu (Boivin a kol., 2001). Rowe a kol. (2012) však upozorňujú na dĺžku trvania štúdie pri pozorovaní vplyvu hĺbky rastového média na produktivitu a rozmanitosť rastlín. Z ich výskumu totiž vyplýva, že hlbšie substráty (7,5 cm) síce podporujú rast vegetácie, ale v dlhodobom experimente sa stabilné druhy našli aj v plytkom substráte (2,5 cm). V oboch prípadoch, v hlbšom aj plytkom substráte, sa množstvo druhov postupom času redukovalo na úkor niekoľkých lepšie prispôbovaných druhov, ktoré boli schopné vytvoriť trvalú pokrývku zelene. Rozdiel bol v tom, že v tenšom substráte bol proces redukcie druhov rýchlejší a nakoniec po siedmych rokoch dominovali iba rastliny rodu *Sedum*. Avšak aj v tomto rode sú druhy, ktoré sú rôzne prispôbované na prežitie v nižšom substráte. Tak ani v uvedenom prípade nie je celý rod jednoznačne vhodný na vysádzanie v plytkých extenzívnych strešných substrátoch (Getter a Rowe, 2008).

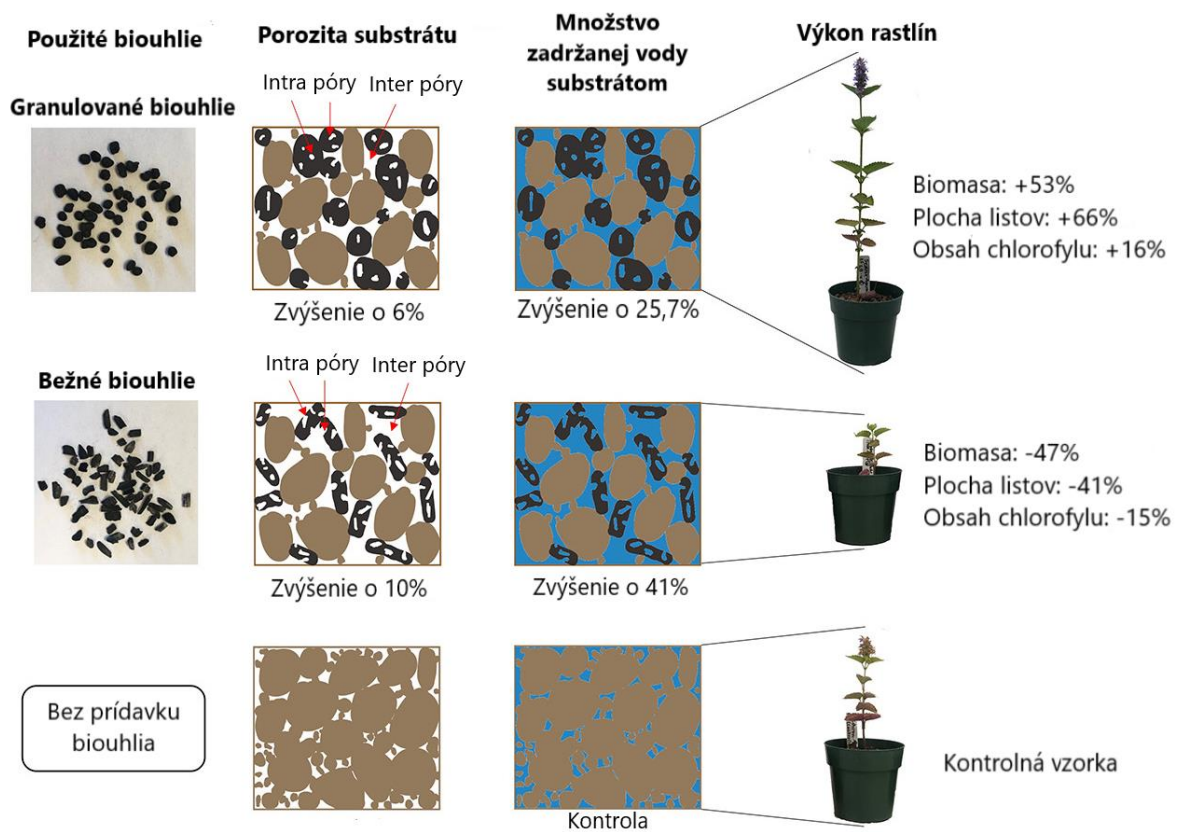
1.4.2. Vplyv prídavku biouhľia na rastliny extenzívnych strešných substrátov

Aditíva pridávané so rastových médií pomáhajú zlepšiť vlastnosti strešných substrátov a tým vytvárať vhodnejšie prostredie pre rast rastlín. Tieto prímеси by mohli zjednodušiť realizáciu a údržbu zelených striech, najmä vegetácie (Luo a kol., 2015).

Biouhlie môže zlepšiť pórovitosť, množstvo dostupných živín, pH a kationovú výmennú kapacitu substrátu, čím sa ovplyvní produkcia rastlinnej biomasy. Rovnako zvyšuje už spomínanú vlhkosť substrátu a množstvo vody dostupnej rastlinám (Chen a kol., 2021). Pri 30% (v/v) prídavku biouhľia sa pozorovalo 16% zvýšenie množstva vody dostupnej pre rastliny. Rovnaký prídavok oddľoval aj trvalý bod vädnutia približne o dva

dni (Cao a kol., 2014). V tomto bode je sila viazania vody na pôdne častice tak vysoká, že sa pre rastliny stáva nemožné ju extrahovať v množstve potrebnom pre ich prežitie. Ak vlhkosť substrátu zostane pod hodnotou bodu vädnutia počas dlhšieho obdobia dochádza k odumretiu rastlín (Datta a kol., 2017). Zistenia autorov Cao a kol. (2014) tak naznačujú, že pri prídavku biouhlie by sa výber vysádzaných rastlín mohol rozšíriť aj na druhy, ktoré sú náročnejšie na hydrologické podmienky pôdy.

Množstvo vody zadržanej biouhlím ovplyvňuje veľkosť častíc použitého biouhlie. Granulované biouhlie výrazne zlepšuje rast rastlín, ich reprodukciu a fyziologický stav. Zároveň neutralizuje pH substrátu a zvyšuje jeho schopnosť zadržiavať vodu. Bežné biouhlie s menšími časticami znižuje objemovú hmotnosť substrátu, zvyšuje jeho celkovú pórovitosť a množstvo vody zadržanej substrátom (viď. 1.3.3), ale potláča rast rastlín (Obr. 9) (Liao a kol., 2022).



Obr. 9. Vplyv biouhlie s rôznou veľkosťou častíc na výkonnosť rastlín (upravené podľa Liao a kol., 2022).

Biouhlie môže pôsobiť aj ako hnojivo s pomalým uvoľňovaním živín alebo iných mikronutrientov potrebných pre rast rastlín. Tento efekt výrazne napomáha rastu a preživanju rastlín v extrémnych podmienkach, ktoré vytvára extenzívna zelená strecha

(Liao a kol., 2022; Tan a kol., 2015). Biouhlie tak zvyšuje celkový obsah živín v substráte a aj živín prístupných rastlinám. Vďaka poréznej štruktúre a silnej adsorpcii, ktoré zvyšujú zadržiavanie živín (fosforu, dusíka a draslíka) sa znižujú straty spôsobené lúhovaním dažďovou vodou (Beck a kol., 2011; Kuoppamäki a Lehvävirta, 2016).

1.5. Kvalita odtekajúcej dažďovej vody

Mnohé štúdie (Berndtsson, 2010; Gnecco a kol., 2013; Seidl a kol., 2013) porovnávali kvalitu odtoku z bežných nepriepustných strešných krytín s odtokom zo zelených striech. Z ich výsledkov je zrejme nižšia koncentrácia ťažkých kovov, najmä zinku a medi v odtoku zo zelených striech. Berndtsson (2010) vo svojej práci poukázal aj na pomerne malý rozdiel medzi koncentráciou ťažkých kovov v odtoku z extenzívnych zelených striech a v dopadajúcej zrážkovej vode. Tým dokázal, že zelené strechy nie sú priamym zdrojom ťažkých kovov. Avšak, v prípade obsahu rastlinných živín (fosforu a dusíka) a mikronutrientov (draslíka, vápnika, železa) v odtoku boli zelené strechy a najmä strešné substráty vyhodnotené ako ich priamy zdroj (Gnecco a kol., 2013; Liu a kol., 2019; Teemusk a Mander, 2007).

Zelené strechy môžu zlepšovať kvalitu odtekajúcej dažďovej vody prostredníctvom zvyšovania jej hodnoty pH. Týmto spôsobom sa môže zmierniť vplyv kyslých dažďov na sladkovodné a suchozemské ekosystémy alebo na historické budovy, pamiatky v mestských oblastiach (Hashemi a kol., 2015).

Podľa vyššie uvedených štúdií je zrejme, že lúhovanie živín zo strešných substrátov predstavuje problém pri zavádzaní zelených striech v mestských oblastiach (Beck a kol., 2011).

1.5.1. Vplyv extenzívneho strešného substrátu na kvalitu odtekajúcej dažďovej vody

Vek substrátu zelených striech je jedným z najdôležitejších parametrov ovplyvňujúcich kvalitu odtekajúcej dažďovej vody. Bolo dokázané, že so stúpajúcim časom prevádzky živej strechy klesá množstvo živín (fosforu, dusíka) a organického uhlíka v odtekajúcej zrážkovej vode. Tento efekt sa prejavuje už v priebehu prvého roka od založenia novej strechy (Gong a kol., 2014; Harper a kol., 2015).

Akther a kol. (2021) testovali extenzívne strešné substráty v laboratórnych aj reálnych podmienkach. V oboch prípadoch potvrdili postupný pokles množstva vylúhovaných živín, pričom počas prvého roka bola rýchlosť lúhovania výraznejšia ako v ďalšom sledovanom období. Významný je aj tzv. efekt prvého prietoku, kedy sa zo striech

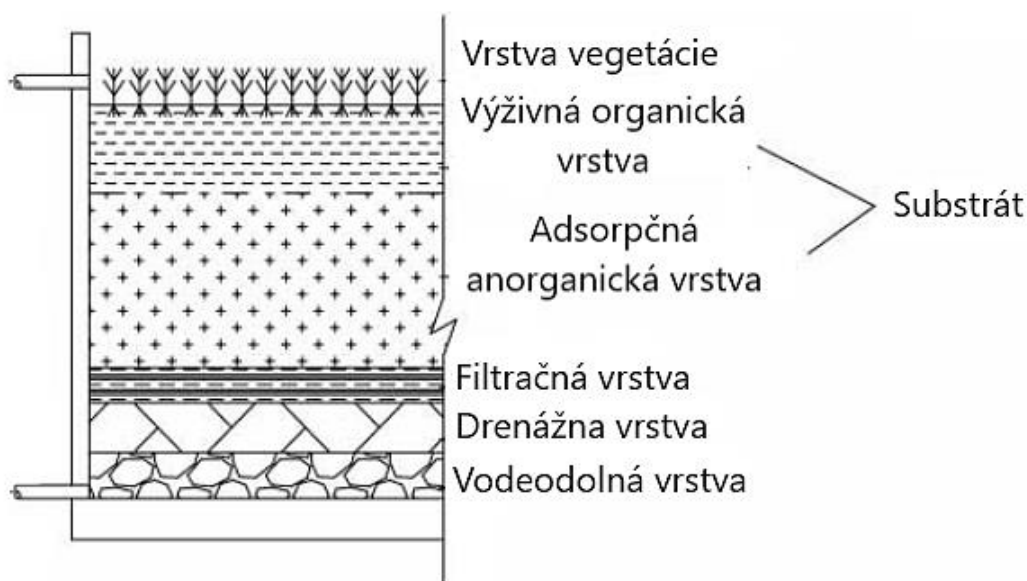
uvoľňuje najviac polutantov počas prvých zrážkových udalostí. Tento jav je známy hlavne z bežných mestských nepriepustných striech. V odtoku zo zelených striech sa predpokladala konštantná koncentrácia rozpustených látok. Z pozorovaní je ale zrejmé, že počas tejto udalosti sa zo zelených striech, a najmä zo substrátu, uvoľní najväčšie množstvo znečisťujúcich látok v porovnaní so vzorkami odobratými neskôr (Berndtsson a kol., 2008; Vijayaraghavan a kol., 2012).

Vylúhovanie živín a rizikových prvkov do odtekajúcej zrážkovej vody ovplyvňuje aj výška rastového substrátu. Nižší substrát má nízku retenčnú kapacitu a tak umožňuje rýchlejší prechod živín do odtoku. V hlbšom substráte je prietok pomalší a zvyšuje sa možnosť adsorpcie alebo reakcie prvku s časticami substrátu, čo vedie k vyššej fixácii znečisťujúcich látok (Wang a kol., 2017).

Významným zdrojom rastlinných živín (NO_3^- a PO_4^{3-}) v odtekajúcej zrážkovej vode sú najmä hnojivá a organické látky v substráte (Bliss a kol., 2009). Fosfor pritom vykazuje vyššiu tendenciu odolať vyplaveniu zo substrátov vďaka adsorpcii na organické a minerálne častice (Akther a kol., 2021). Preto by sa mala zvýšená pozornosť venovať substrátom s vysokým percentom rašeliny a kompostu, a to najmä v počiatkových fázach od založenia zelenej strechy (Zhang a kol., 2017). Rastové substráty s obsahom organických látok okolo 50 - 60% vykazujú v odtoku vyššie koncentrácie fosforu (Karczmarczyk a kol., 2018).

V mnohých štúdiách (Bates a kol., 2015; Graceson a kol., 2014; Nagase a Dunnett, 2011; Vijayaraghavan a Raja, 2014) autori využili ako súčasť rastového substrátu aj drvené tehly. Ich aplikácia poskytuje ekonomické a environmentálne výhody, keďže sa ich opätovným použitím znižuje množstvo produkovaného odpadu (Molineux a kol., 2009). Avšak, kvôli vyššiemu obsahu ťažkých kovov, najmä kadmia a niklu, sa ich využitie obmedzuje (Ye a kol., 2013). Drvené tehly, piesok a štrk môžu byť tiež zdrojom fosforu (Karczmarczyk a kol., 2018) a používaná škvara zo zlievarní a spaľovní často obsahuje ťažké kovy (Rowe, 2011).

Okrem celkového zloženia substrátu kvalitu odtekajúcej zrážkovej vody ovplyvňuje aj uloženie organickej a anorganickej zložky. Jednovrstvový substrát je tvorený zmesou obsahujúcou obe zložky. Dvojrvtvový substrát (Obr. 10) tvorí vrchná tenšia organická časť, ktorá podporuje výživu rastlín a spodná hrubšia anorganická, kde sa zadržiavajú polutanty a voda (Gong a kol., 2014). Wang a kol. (2017) dokázali, že dvojrvtvové substráty v porovnaní s jednovrstvovým substrátom výraznejšie redukujú obsah ťažkých kovov, organických látok a všetkých foriem dusíka. Vystupovali však ako zdroj fosforu a to hlavne počas silných dažďov.



Obr. 10. Náčrt modelu extenzívnej zelenej strechy s dvojvrstvovým substrátom (upravené podľa Gong a kol., 2014)

1.5.2. Kvalita dažďovej vody odtekajúcej zo substrátu s prídavkom biouhlia

Fyzikálne vlastnosti biouhlia, ako pórovitosť, veľký špecifický povrch prítomnosť pozitívne i negatívne nabitých funkčných skupín, naznačujú, že je možné ho využiť na zlepšenie kvality rastového média a tým aj odtekajúcej vody prostredníctvom adsorpcie organických aj anorganických látok. Po aplikácii biouhlia sa už pri 7%-nom prídavku pozorovala sorpcia celkového dusíka, celkového fosforu, dusičnanov, fosforečnanov, ťažkých kovov a organických látok z odtoku (Beck a kol., 2011, Xie a kol., 2015). Potenciál biouhlia imobilizovať ťažké kovy vychádza z jeho štruktúry. Nano, mikro a makroporézna štruktúra biouhlia vytvára podmienky pre vznik menej mobilných foriem kovov (Beesley a kol., 2013). Podobne aj zásaditý charakter biouhlia spôsobuje vyzrážanie niektorých kovov z roztoku. Tie sa potom zachytávajú na povrchu uhlia a tak sa stávajú nedostupné pre rastliny (Deem a Crow, 2017).

Niektoré štúdie (Beck a kol., 2011; Qianqian a kol., 2019) naznačujú výrazný vplyv biouhlia najmä pri redukcii celkového dusíka, dusičnanov, celkového fosforu, fosforečnanov a chemickej spotreby kyslíka vo vode odtekajúcej zo zelených striech. Beck a kol. (2011) uvádzajú zníženie koncentrácie dusíka o 79 až 97%, zníženie množstva organického uhlíka o 67 až 72% a fosforu o 20-52%.

2. Ciele

Cieľom tejto diplomovej práce bolo:

- spracovať literárny prehľad o vplyve biouhlia na vybrané fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti extenzívnych strešných substrátov,
- posúdiť vhodnosť využitia biouhlia na báze čistiarenských kalov ako ďalšej zložky strešných substrátov v laboratórnych aj reálnych podmienkach,
- porovnať výkonnosť substrátov s rôznym prídavkom biouhlia (10% a 20%).

3. Materiál a metódy

3.1. Prístroje

V práci sme využili nasledovné prístroje a zariadenia: analytické váhy LAG214i (VWR), UV-VIS spektrofotometer Cary 50 (Varian, Austrália), rotačná trepačka (Biosan, Lotyšsko), inkubovateľná trepačka Enviromental Shaker ES-20 (Biosan, Lotyšsko), multimeter Hanna Instruments 3220, zariadenie na prípravu deionizovanej vody Simplicity s vodivosťou 0,4 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Millipore), datalogger TrueLog 100 a senzory pôdnej vlhkosti a teploty SMT100 (Truebner, Nemecko), meteostanica Garni 935PC s bezdrôtovým senzorom 2INT (Garni, ČR), váhy s tenzometrickým senzorom Zemic L6G, váhy GAB-N1.7 (Kern, Nemecko), termoreaktor CR 3200 (WTW, Nemecko), automatické pipety.

3.2. Laboratórne experimenty

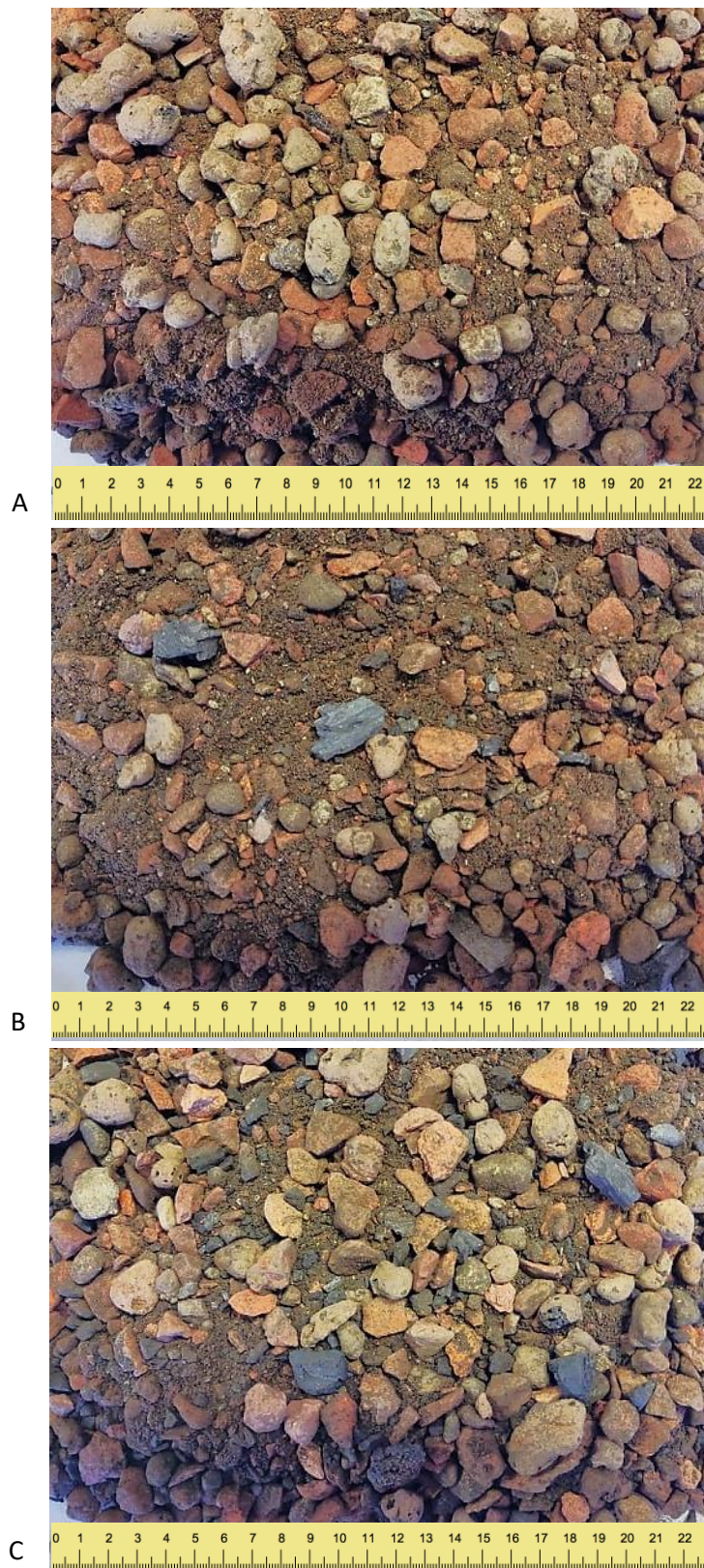
V laboratórnych experimentoch sme obohatili komerčný extenzívny strešný substrát biouhlím na báze čistiarenských kalov a určili fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti pôvodného aj upravených substrátov.

3.2.1. Príprava strešných substrátov

V experimentoch sme použili extenzívny strešný substrát pripravený firmou JV Intersad, s.r.o. Ten vznikol zmiešaním minerálnej drte, keramzitu, riolitu a kompostu v definovanom pomere. V tabuľke 4 z dôvodu ochrany produktu neuvádzame názvy jednotlivých zložiek. Takto pripravený substrát sme ďalej modifikovali prídavkom biouhlia z čistiarenských kalov (Obr. 11) v množstve 10% a 20% (v/v). Biouhlie bolo pripravené v procese rýchlej pyrolýzy pri 600-650°C a dobou zadržania 10 min. Pyrolýza prebiehala prostredníctvom kontinuálneho pyrolýzneho reaktoru Pyreka 2.1 (Ithaka Inst., Švajčiarsko).

Tab. 4. Percentuálne zloženie použitých extenzívnych strešných substrátov

Zloženie	Substrát	Substrát s 10% (v/v) biouhlia	Substrát s 20% (v/v) biouhlia
Zložka 1	20%	18%	16%
Zložka 2	10%	9%	8%
Zložka 3	10%	9%	8%
Zložka 4	30%	27%	21%
Zložka 5	30%	27%	21%
Biouhlie	0%	10%	20%



Obr. 11. Fotografie pripravených extenzívnych strešných substrátov – komerčný substrát firmy JV Intersad, s.r.o. bez biouhlia (A), s 10% (B) a 20% prídavkom biouhlia na báze čistiarenských kalov (C).

3.2.2. Objemová hmotnosť strešných substrátov

Pri určení objemovej hmotnosti substrátov sme postupovali v súlade s normou FLL – Green Roof Guidelines (2018). Použili sme kovovú nádobu v tvare valca s perforovaným dnom. Vnútorň priemer dna nádoby bol 10 cm a výška 16,7 cm. Dno nádoby sme prekryli kovovou sieťkou a takto pripravenú aparatúru odvážili. Následne sme nádobu naplnili mierne vlhkou vzorkou strešného substrátu s objemom asi 700 ml. Kompaktnú formu substrátu sme dosiahli údermi závažia o hmotnosti 5 kg, pričom priemer závažia sa zhodoval s priemerom nádoby. Každú vzorku sme zhutnili jedným úderom. Zistili sme presnú výšku vzorky strešných substrátov v kompaktnom stave (približne 8 cm), hmotnosť naplnenej nádoby (m_f) a vypočítali objemovú hmotnosť substrátu (ρ_f). Povrch substrátu sme zakryli filtrom z geotextílie, ďalším kovovým sitkom a zaťažili kameňom. Takto pripravenú nádobu sme vložili do plastového vedra na plastové podložky a pomaly pridávali vodu približne do výšky 1 cm pod povrch vzorky (Obr. 12).



Obr. 12. Prevedenie experimentu realizovaného pri zisťovaní objemovej hmotnosti a permeability extenzívnych strešných substrátov.

Saturácia substrátu prebiehala minimálne 1 hodinu alebo až kým nebol na dotyk mokry. Následne sme doplnili vodu tak, aby siahala asi 1 cm nad povrch substrátu. Po 24 hodinovej saturácii sme nádobu preložili na plastové drenážne platne a nechali odtekať 2 hodiny. Odstránili sme geotextíliu, sitko a kameň z povrchu vzorky a nádobu odvážili (m_{vk}). Zo získaných údajov sme vypočítali objemovú hmotnosť substrátu pri maximálnej vodnej kapacite ρ_{vk} . Po stanovení permeability (kapitola 3.5.) sme vzorku sušili pri 105°C do konštantnej hmotnosti po dobu minimálne 48 hodín. Nádobu sme opäť zväžili (m_t) a vypočítali objemovú hmotnosť substrátu v suchom stave ρ_t . Postup sme realizovali s každou vzorkou v dvoch opakovaníach.

Objemovú hmotnosť (6) vo vlhkom (ρ_f), vodou nasýtenom (ρ_{vk}) aj suchom stave (ρ_t) a maximálnu vodnú kapacitu (WK) (7) substrátov sme vypočítali použitím nasledovných vzťahov:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (6)$$

ρ ($\rho_f, \rho_{vk}, \rho_t$) – objemová hmotnosť pri daných podmienkach nasýtenia substrátu (g cm^{-3})

m (m_f, m_{vk}, m_t) – hmotnosť vzorky pri daných podmienkach nasýtenia substrátu (g)

V – objem vzorky (cm^3)

h – výška vzorky v kompaktnom stave (cm)

$$VK = \frac{(m_{vk} - m_t) \times 100}{V} \quad (7)$$

WK – maximálna vodná kapacita substrátu (%)

m_{vk} – hmotnosť vodou nasýteného substrátu (g)

m_t – hmotnosť substrátu po vysušení (g)

V – objem substrátu (cm^3)

3.2.3. Permeabilita strešných substrátov

Pri stanovení permeability strešných substrátov sme taktiež postupovali podľa FLL – Green Roof Guidelines (2018), pričom sme využili substrát v stave maximálnej vodnej kapacity (3.2.2). Povrch vzorky sme opäť prekryli kovovou sieťkou, do stredu sme zapichli jednoduchú meraciu sondu, na ktorej sme vo výške 3 a 4 cm nad úrovňou substrátu urobili značky. Nádobu so strešným substrátom sme postavili na drenážne dosky a priamo na substrát rovnomerne liali vodu dovtedy, kým sme nedosiahli úroveň nad hornou značkou sondy. Zmerali sme čas, za ktorý hladina vody klesla z úrovne hornej značky na spodnú značku. Toto meranie sme zopakovali trikrát s každým opakovaním danej vzorky strešného substrátu. Z priemernej hodnoty nameraných časov sme vypočítali permeabilitu substrátu podľa vzťahu (8) a výsledok sme následne prepočítali na mm/min:

$$K_f = \frac{1}{t} \times \frac{h}{h+4} \quad (8)$$

K_f – permeabilita (cm s^{-1})

t – čas, za ktorý voda klesla z úrovne hornej značky na úroveň spodnej značky (s)

h – výška vzorky v kompaktnom stave (cm)

3.2.4. Obsah vzduchu a pórovitosť substrátov

Na realizáciu merania sme použili tetrapakové obaly od mlieka s rozmermi dna 7×7 cm (Latshaw a kol., 2009). Krabicu sme zrezali na výšku 14 cm a do dna urobili dva otvory, ktoré sme zapchali gumenými zátkami. Takto pripravené obaly sme naplnili reprezentatívnou vzorkou každého substrátu a jemným zhutnením zarovnali na výšku 10 cm (čo odpovedá 490 ml substrátu). Pomocou odmerného valca s objemom 100 ml sme vzorku priamo zalievali vodou, až kým sme nedosiahli hladinu približne 1 mm nad jej povrchom. Zo zaznamenaného objemu sme vypočítali celkovú pórovitosť substrátu (9):

$$P_t = \frac{V_w}{V_t} \cdot 100 \quad (9)$$

kde:

P_t – celková pórovitosť (%),

V_p – objem pridanej vody,

V_t – celkový objem vzorky.

Substráty sme nechali saturovať 24 hodín. Po tomto čase sme vybrali zátky a zachytávali odtekajúcu vodu dovtedy, kým všetka voda nevytiekla. Objem odtečenej vody sme zaznamenali a vypočítali obsah vzduchu v substráte (10):

$$P_g = \frac{V_{wd}}{V_t} \cdot 100 \quad (10)$$

kde:

P_g – obsah vzduchu (%),

V_p – objem odtečenej vody,

V_t – celkový objem vzorky.

Meranie sa realizovalo v troch opakovaníach pre každý pripravený strešný substrát.

3.2.5. TDS a EC extenzívnych strešných substrátov

Meranie elektrickej vodivosti (EC) a celkového množstva rozpustených pevných látok (TDS) extenzívnych strešných substrátov sme realizovali podľa postupu Bado a kol. (2016) v pomere substrát – voda 1:5. Dobře premiešaný substrát (30 g) sme pridali k 150 cm^3 destilovanej vody a pripravenú zmes sme v Erelmeyerových bankách nechali trepať

30 min na trepačke pri 120 rpm. Po 30 min sedimentácii pri laboratórnej teplote (22°C) sme odpipetovali požadované množstvo pripraveného extraktu a zmerali elektrickú vodivosť. Meranie sme uskutočnili v troch opakovaniach s každým pripraveným strešným substrátom.

3.2.6. pH extenzívnych strešných substrátov

Stanovenie pH strešných substrátov sme realizovali v 0,01 M CaCl₂ v pomere 1:5. Ku 30 g dobre premiešaného substrátu sme pridali 150 cm³ roztoku CaCl₂ a pripravenú zmes nechali trepať 1 h na trepačke pri 120 rpm. Po 1 h sedimentácii pri laboratórnej teplote (22°C) sme zmerali pH v extrakte. Rovnako sme postupovali so všetkými pripravenými strešnými substrátmi v troch opakovaniach.

3.2.7. Vlhkosť, obsah popola a množstvo organických látok strešných substrátov

Reprezentatívnu vzorku substrátu získanú dvojnásobným kvartovaním sme nasypali do odváženého žihacieho téglíka. Týmto spôsobom sa analyzovalo vždy približne 60 g substrátu, ktorého hmotnosť sme zaznamenali s presnosťou na 0,01 g. Pripravenú nezakrytú vzorku sme sušili do konštantnej hmotnosti pri 105°C (približne 24 h) a následne nechali vychladnúť v exikátore. Po zaznamenaní hmotnosti vysušenej vzorky sme túto spálili v muflovej peci pri 440 ± 40°C do konštantnej hmotnosti (približne 4 h) a opäť nechali vychladnúť v exikátore. Po poslednom odvážení vzorky sme použitím uvedených vzťahov vypočítali vlhkosť substrátu (11) a obsah popola (12), z ktorého sme dopočítali množstvo organických látok (13) (ASTM International D2974 – 13, 2013):

$$MC = \frac{[(A - B) \cdot 100]}{B} \quad (11)$$

kde:

MC – vlhkosť (%),

A – hmotnosť vzorky pred sušením (g)

B – hmotnosť vzorky po sušení (g).

$$AC = \frac{(C \cdot 100)}{B} \quad (12)$$

kde:

AC – obsah popola (%),

C – hmotnosť popola (g),

B – hmotnosť vzorky po sušení (g).

$$OC = 100 - D \quad (13)$$

kde:

OC – množstvo organických látok (%)

D – obsah popola (%)

Experiment sme realizovali v troch opakovaniach s každým substrátom.

3.2.8. CEC extenzívnych strešných substrátov

Katiónovú výmennú kapacitu (CEC) sme stanovili za použitia roztoku chloridu bárnateho. K 10g strešného substrátu sme pridali 120 cm³ 0,1 M BaCl₂ a zmes trepali hodinu pri laboratórnej teplote. Následne sme výluh odpipetovali a postup zopakovali. Po ďalšej hodine sme opäť odstránili výluh, pridali 120 cm³ 0,025 M BaCl₂ a zmes trepali 19 hodín pri laboratórnej teplote. Po odpipetovaní kvapalnej fázy sme postup opakovali s 0,02 M MgSO₄. Získaný výluh sme titrovali použitím štandardizovaného roztoku 0,02 M Na₂EDTA. Postup sme realizovali v troch opakovaniach pre každý substrát. Výslednú hodnotu CEC sme vypočítali podľa vzťahu (14):

$$CEC = (M_0V_0 - MV_V)\varepsilon \times 10^3 \quad (14)$$

kde:

CEC – katiónová výmenná kapacita (meq 100 g⁻¹),

V_0 a V_V – objem roztoku pridaného Mg a získaného Mg vo výluhu (dm³),

ε – prepočítavací faktor rovný 800 meq (100 g mol⁻¹) pre bivalentné ióny a 0,25 g sorbentu,

M_0 a M – molárna koncentrácia pridaného Mg a získaného Mg vo výluhu (mol dm⁻³) (Frišták a kol., 2013).

3.2.9. Zrinitosť strešných substrátov

Pred samotným stanovením sa vzorky extenzívnych strešných substrátov sušili pri teplote 50°C. Zrinitosťný rozbor sa realizoval použitím laboratórneho sitového triediča TZP ST 500 na sítach s veľkosťou ôk 0,125 mm; 0,25 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 2,00 mm; 4,00 mm; 8,00 mm a 16,00 mm po dobu 10 min.

Hmotnosť vzoriek strešných substrátov sa na jednotlivých sítach určila pomocou laboratórnej váhy Precisa 321LX/1200C. Následne sa vypočítal percentuálny podiel hmotnosti vzorky vo vybraných rozsahoch zrinitosťných tried, z ktorého sa dopočítal podsitný hmotnosťný podiel vzorky.

3.3. Terénny experiment

V laboratóriu charakterizované strešné substráty sme vystavili reálnym poveternostným podmienkam a monitorovali zmeny vybraných fyzikálnych a fyzikálno-chemických vlastností s dôrazom na sledovanie vplyvu pridaného biouhlia pripraveného pyrolýzou čistiarenských kalov.

3.3.1. Experimentálna zelená strecha

Experimentálnu zelenú strechu sme inštalovali na strechu Pedagogickej fakulty Trnavskej univerzity v októbri v roku 2020 (Obr. 13).



Obr. 13. Rozmiestnenie strešného experimentu: (A) substrát s 20% biouhlia, (B) substrát s 10% biouhlia, (C) substrát bez biouhlia, (D) senzory pôdnej vlhkosti a teploty SMT100, (E) zariadenie Quattro pre zber dát z váh, (F) datalogger Truelog 100, (G) nádoby na zber eluátu, (H) senzory na snímanie teploty, (I) solárny panel napájajúci váhy a zariadenie zberajúce dáta z váh, (J) váhy.

Dno polypropylénových boxov s rozmermi $60 \times 40 \times 12$ cm pokrýva drenážna vrstva Nophadrain ND 100, ktorej súčasťou je tlakovo-roznášajúca vrstva a filtračná geotextília. Celková výška tejto vrstvy je 7 mm a tlaková únosnosť dosahuje 500 kN m^{-2} . Do dna každého boxu sme navrtali otvor, ktorý umožňuje do plastových nádob zberať eluát. Takto pripravené boxy sme naplnili 16 l extenzívneho strešného substrátu pripraveného firmou JV Intersad, s.r.o. a substrátom, ktorý sme modifikovali 10 % a 20 % (v/v) prídavkom biouhlia pripraveného rýchlou pyrolýzou čistiarenských kalov pri teplote $600 - 650^\circ\text{C}$. Z každého typu extenzívneho substrátu sme pripravili 4 ks boxov, pričom výška substrátu po zarovnaní dosahovala 8 cm. Do každého boxu sme zasadili 9 rastlín rodu *Sedum* a boxy uložili na drevené palety na streche so sklonom $4,5^\circ$. V júli 2021 sme inštalovali pod 3 experimentálne plochy (boxy) nami navrhnuté a skonštruované vážiace zariadenia s citlivým tenzometrickými senzormi Zemic 6LG s váživosťou do 50 kg, ktoré monitorujú hmotnosť boxov v 15 min intervale (Obr. 14). Zaznamenané údaje sú dostupné cez aplikáciu v mobilnom telefóne, ktorá bola pre tento účel vytvorená v spolupráci s firmou DomAtom, s.r.o.



Obr. 14. Uloženie boxov na drevených paletách. (A) Vážiace zariadenie s tenzometrickým senzorom Zemic 6LG.

3.3.2. Monitorovanie pôdnej vlhkosti a poveternostných podmienok

Dennú teplotu, vlhkosť a úhrn zrážok sme monitorovali pomocou meteostanice Garni 935 PC, ktorá je umiestnená 2 m nad povrchom strechy v tesnej blízkosti experimentálnych plôch zelených striech (Obr. 15). Súčasťou meteostanice je integrovaný bezdrôtový senzor 2INT. Kontinuálny zber dát prebiehal v časovom intervale 30 min. Vlhkosť a teplotu

substrátu sme kontinuálne monitorovali od 30.10.2020 každých 30 min použitím senzorov pôdnej teploty a vlhkosti SMT 100 (Truebner, Nemecko). Jeden senzor sme umiestnili do boxu so substrátom bez biouhlia, dva do boxov so substrátom s prídavkom 10% biouhlia a jeden do boxu s prídavkom 20% biouhlia. Dáta sa zaznamenávali na datalogger TruLog 100 s využitím softvéru TrueLog 100-configuration software V2.5.0 (Truebner, Nemecko).



Obr. 15. Umiestnenie meteostanice Garni 935PC vo výške 2 m nad povrchom v blízkosti experimentálnych plôch zelených striech.

3.3.2 pH, EC, TDS a CHSK vo vode odtekajúcej z extenzívnych strešných substrátov

Eluát sme zachytávali do plastových nádob, z ktorých sme vzorky odoberali v nepravidelných intervaloch závislých od zrážkových udalostí. Vo vzorkách sme následne zmerali pH, elektrickú vodivosť (EC) a celkové množstvo rozpustených látok (TDS) pomocou multimetera HI3220.

Na stanovanie chemickej spotreby kyslíka vo vode odtekajúcej z extenzívnych strešných substrátov sme použili modifikovanú semimikrometódu založenú na oxidácii organických látok dichrómanom draselným v silne kyslom prostredí kyseliny sírovej. V prvom kroku sme pripravili oxidačný a katalyzátorový roztok. Na prípravu 100 cm³ oxidačného roztoku sme zmiešali deionizovanú vodu, 1,022 g predsušeného K₂Cr₂O₇, 16,7 cm³ koncentrovanej H₂SO₄ a 3,33 g HgSO₄. Katalyzátorový roztok (250 cm³) sme pripravili zmiešaním 2,5 g Ag₂SO₄ s koncentrovanou H₂SO₄. CHSK sme stanovovali v 2 cm³ vzorky, ku ktorej sme pridali 1 cm³ oxidačného roztoku a 3 cm³ katalyzátorového roztoku. Zmes sme následne zahrievali v termoreaktore dve hodiny pri 148°C a po vychladnutí zmerali absorbanciu pri 600 nm. Na zostrojenie kalibračnej krivky sme použili roztoky hydrogénftalátu draselného s koncentraciou 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 mg l⁻¹.

3.3.4. Rastlinný pokryv substrátu

Pokryv substrátu rastlinami *Sedum* sme určili analýzou digitálnych fotografií. Experimentálne plochy boli fotené na jar, v lete a na jeseň roku 2021 a v zime roku 2022. Snímky sme analyzovali v programe Fiji – ImageJ – win64, v ktorom sme nastavili odtieň, saturáciu a jas v závislosti od pozadia analyzovanej plochy. Výsledkom analýzy je binárny obrázok, kde čierne pixely zodpovedajú výberovým kritériám - rastlinám.

4. Výsledky a diskusia

V súčasnosti sú zelené strechy široko propagovaným urbánnym prvkom a to vďaka svojim environmentálnym a ekonomickým výhodám. Komponenty zelenej strechy však vytvárajú veľmi náročné prostredie pre rast rastlín, ktoré zohrávajú kľúčovú úlohu pri poskytovaní (v literárnom prehľade spomínaných) výhod mestám (Obendorfer a kol., 2007). Najdôležitejším komponentom z hľadiska výživy, dostupnej vody a fyzickej opory pre rastliny je strešný substrát. Ukazuje sa, že pri zmene vlastností bežne používaných základných surovín (organickej, anorganickej a vodu absorbujúcej zložky) sa môže výrazne zmeniť počiatočný rast, výkonnosť a produktivitu rastlín (Young a kol., 2014). Ako zaujímavé aditívum do strešných substrátov sa javí biouhlie, najmä vďaka svojej nízkej objemovej hmotnosti a vysokej schopnosti zadržiavať vodu a živiny (Liao a kol., 2022). Dôkladná rešerš odbornej a vedeckej literatúry ukazuje, že vplyv biouhlia na vlastnosti strešných substrátov z krátkodobého i dlhodobého hľadiska je stále málo preskúmaný. Aj preto sa táto diplomová práca zameriava na posúdenie vplyvu biouhlia na báze čistiarenských kalov na vlastnosti extenzívnych strešných substrátov v laboratórnych i reálnych podmienkach a možnosti jeho využitia ako ďalšej zložky pre strešné substráty.

4.1. Charakteristika pripravených strešných substrátov v laboratórnych podmienkach

Komerčný extenzívny strešný substrát pripravený firmou JV INTERSAD, s.r.o. sme modifikovali prídavkom biouhlia z čistiarenských kalov v množstve 10% a 20% (v/v) (Tab. 4). V laboratórnych podmienkach sme stanovili fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti takto pripravených substrátov, pričom sme vychádzali z normy Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs, ktorú vypracoval German Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL, 2018). Prídavok biouhlia sa zvolil tak, aby obsah kovových aj nekovových prvkov v modifikovanom strešnom substráte bol v súlade s Vyhláškou Ministerstva pôdohospodárstva č. 577/2005 Z.z., ktorou sa ustanovujú typy hnojív, zloženie, balenie a označovanie hnojív, analytické metódy skúšania hnojív, rizikové prvky, ich limitné hodnoty pre jednotlivé skupiny hnojív, prípustné odchýlky a limitné hodnoty pre hospodárske hnojivá. Bližšie informácie sú uvedené v bakalárskych prácach Urbanová (2020) a Vavrincová, (2021).

4.1.1. Objemová hmotnosť a maximálna vodná kapacita

Z konštrukčného hľadiska je kľúčovým parametrom strešného substrátu objemová hmotnosť. Naše výsledky naznačujú, že prídavok biouhlia do komerčného strešného

substrátu vedie ku zníženiu objemovej hmotnosti v suchom stave (ρ_t) o takmer 9%, pričom maximálna vodná kapacita stúpa o 3 – 5,5% v závislosti od zvyšujúceho sa obsahu biouhlia (Tab. 5). Tieto závery sa zhodujú s dostupnou literatúrou (Yuristy, 2013; Cao a kol., 2014; Werdin a kol., 2021, Farrell a kol., 2016), kde autori poukazujú na znižovanie objemovej hmotnosti substrátu v závislosti od prídavku biouhlia. V našom prípade sme pozorovali iba minimálne rozdiely v objemovej hmotnosti v suchom stave pri substrátoch s prídavkom biouhlia. Tento jav môže súvisieť aj s veľkosťou častíc biouhlia, pričom Werdin a kol. (2021) pozorovali pri aplikácii 20% biouhlia s jemnými časticami zvýšenie objemovej hmotnosti substrátu o 2% oproti kontrolnej vzorke.

Tab. 5. Priemerné hodnoty objemovej hmotnosti (ρ_{wk} , ρ_t), maximálnej vodnej kapacity (VK) a vlhkosti (MC) substrátov realizované podľa FLL (2018) a ASTM D2974-13 (2013).

	FLL	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
ρ_t (g cm ⁻³)	-	1,04 ± 0,02	0,95 ± 0,00	0,96 ± 0,01
ρ_{wk} (g cm ⁻³)	-	1,43 ± 0,04	1,36 ± 0,01	1,40 ± 0,04
VK (%)	35 – 65	38,6 ± 1,7	41,6 ± 0,1	44,0 ± 2,0
MC (%)	-	9,94 ± 0,88	12,49 ± 2,50	9,37 ± 0,64

Počiatočná vlhkosť pripravených substrátov sa pohybovala v rozmedzí 9,37 až 12,5%. Objemová hmotnosť v nasýtenom stave ρ_{wk} v prípade 10% prídavku biouhlia dosiahla 1,36 g cm⁻³ a pri 20% prídavku 1,40 g cm⁻³. Je teda zrejmé, že prídavok biouhlia zvyšuje maximálnu vodnú kapacitu, ktorá dosahuje až 44% pri 20% prídavku.

4.1.2. Permeabilita

Zistené hodnoty permeability extenzívnych strešných substrátov spĺňajú kritériá ako ich uvádza norma FLL (2018) (Tab. 6). Ako najmenej priepustný sa javí substrát s 20% prídavkom biouhlia. Medzi zvyšnými dvoma testovanými strešnými substrátmi sme výrazný rozdiel v permeabilite nepozorovali.

Tab. 6. Hodnoty permeability (K_f) substrátov porovnané s FLL (2018).

	FLL	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
K_f (mm min ⁻¹)	0,6 – 70	5,0 – 8,3	6,8 – 8,3	2,3 – 5,3

Získané dáta uvádzame v číselnom rozmedzí kvôli výrazne nekonzistentným údajom. Zreteľné odchýlky v meraní prezentujú aj Stovin a kol. (2015), ktorí poukazujú na

obmedzenú presnosť a celkovo relevantnosť tejto metódy. Tá je určená predovšetkým na kontrolu limitných hodnôt permeability a nie na presnú fyzikálnu charakterizáciu. Navyše, použitie pomerne malej vzorky substrátu a zaznamenávanie času poklesu hladiny vody v rozsahu len 1 cm vedú k výrazne rozdielnym výsledkom. Z tohto dôvodu aj Fassman a Simcock (2012) zdôrazňujú potrebu ďalšieho výskumu na definovanie relevantného štandardného testu priepustnosti substrátov pre zelené strechy.

4.1.3. Pórovitosť a obsah vzduchu

Dôležitým parametrom pri charakterizácii strešných substrátov je obsah vzduchu. Tým sa zabezpečuje výmena plynov koreňmi (koreňové dýchanie) a zabraňuje sa nadmernému nasiaknutiu substrátov vodou (Francis a kol., 2014). FLL (2018) odporúča obsah vzduchu najmenej 10% a Latshaw a kol. (2009) odporúčajú až 25%. Z výsledkov našej práce je zrejmé, že prídavok biouhlia celkovo zvyšuje percentuálny obsah vzduchu v pripravených substrátoch (Tab. 7), pričom všetky pripravené substráty spĺňajú hodnotu odporúčanú FLL normou. Pri 20% prídavku biouhlia sme zaznamenali najvyššie hodnoty celkovej pórovitosti, ale nižšiu hodnotu P_g ako v substráte s 10% biouhlia. Vysvetlením by opäť mohol byť vyšší obsah jemných častíc biouhlia, čo spôsobuje zvýšenie vodozadržnej kapacity, ale negatívne vplyva na obsah vzduchu v substráte (Nemati a kol., 2015). Pre správnu výkonnosť a produktivitu rastlín by obsah vzduchu mal predstavovať asi polovicu z celkovej hodnoty pórovitosti (Latshaw a kol., 2009). K tomuto odporúčaniam sa najviac priblížil substrát s 10% biouhlia.

Tab. 7. Priemerné hodnoty pórovitosti (P_t) a obsahu vzduchu (P_g) substrátov porovnané s FLL (2018).

	FLL	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
P_t (%)	-	43,0 ± 2,6	46,2 ± 0,6	50,4 ± 0,7
P_g (%)	≥ 10	15,8 ± 4,3	20,0 ± 2,6	17,7 ± 1,6

4.1.4. pH, EC a TDS

Fyzikálno-chemické vlastnosti substrátov uvedené v Tabuľke 8 neprekračujú limitné hodnoty odporúčané normou FLL (2018) a vyhláškou č. 577/2005 Z.z. pH mierne stúpa so zvyšujúcim sa obsahom biouhlia v substráte. Pomerne vysoké pH v substráte bez biouhlia udržiava keramzit. Je známe, že rastové média s keramzitom môžu dosahovať pH až 10,6, pričom táto hodnota nie je pufrovaná a môže rýchlo klesnúť po prvých silných dažďoch

(Carrilo a kol., 2012). V priebehu času, tak môže dôjsť k okysleniu substrátu (Jauch a Fischer, 2000). Biouhlie naopak udržuje stálejšie hodnoty pH po dlhší čas. Avšak tento efekt výrazne závisí od vlastností použitého biouhlia (Dai a kol., 2014).

Tab. 8. Hodnoty pH, elektrickej vodivosti (*EC*) a celkového množstva rozpustených pevných látok (*TDS*) substrátov porovnané s FLL (2018).

	FLL	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
pH_{CaCl2}	6.0 – 8.5	7.42 ± 0,03	7.55 ± 0,03	7.61 ± 0,28
EC (dS m⁻¹)	-	0,721 ± 0,038	0,559 ± 0,039	0,513 ± 0,008
TDS (ppm)	≤ 3500	360 ± 20	278 ± 22	257 ± 4

Elektrická vodivosť (*EC*) vyjadruje koncentráciu rozpustených solí vo vodnom roztoku. FLL norma (2018) v tomto prípade neuvádza žiadne referenčné hodnoty. Avšak, Vyhláška č. 577/2005 (Vyhláška Ministerstva pôdohospodárstva Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú typy hnojív, zloženie, balenie a označovanie hnojív, analytické metódy skúšania hnojív, rizikové prvky, ich limitné hodnoty pre jednotlivé skupiny hnojív, prípustné odchýlky a limitné hodnoty pre hospodárske hnojivá) definuje vybrané fyzikálne a chemické vlastnosti pestovateľských substrátov, medzi ktorými spomína aj maximálne odporúčané hodnoty *EC*. Tie sa pohybujú v rozmedzí od 0,6 dS m⁻¹ pre citlivé rastliny po 1,2 dS m⁻¹ pre ostatné typy rastlín. Nami testované substráty vyhovujú aj najnižším hodnotám z vyhlášky, pričom biouhlie signifikantne znižuje hodnoty elektrickej vodivosti (Tab. 8). Rovnako výrazne znižuje aj množstvo rozpustených látok (*TDS*).

4.1.5. CEC

Katiónová výmenná kapacita (*CEC*) je mierou negatívnych nábojov na povrchoch pôdnych častíc (resp. častíc substrátu), ktoré adsorbujú alebo vymieňajú z pôdneho roztoku nutrienty v podobe katiónov (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) (Sonon a kol., 2017). *CEC* je preto jedným z najdôležitejších parametrov, ktorý sa zvažuje pri hodnotení úrodnosti pôdy (Fellet a kol., 2011). Podľa ASTM International E2777 – 14 (2014) – Standard Guide for Vegetative Roof Systems sú odporúčané hodnoty *CEC* pre zelené strešné systémy aspoň 6 meq 100 g⁻¹. Táto hodnota zaisťuje dostatočnú zásobu živín pre rastliny. Zo všetkých nami testovaných substrátov túto hodnotu dosiahol len komerčný substrát. So stúpajúcim obsahom biouhlia, *CEC* substrátov klesala (Tab. 9). Uvedený záver sa nezhoduje s výsledkami z dostupnej

odbornej literatúry (Fellet a kol., 2011; Li a kol., 2017; Chen a kol., 2021, Frimpong a kol., 2021), v ktorej uvádzajú pozitívny vplyv prídavku biouhlia na hodnotu kationovej výmennej kapacity substrátov.

Tab. 9. Priemerné hodnoty kationovej výmennej kapacity (CEC) substrátov.

	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
CEC (meq 100g⁻¹)	6,28 ± 1,20	3,66 ± 0,37	1,99 ± 1,14

Avšak, Hailegnaw a kol. (2019) upozorňujú na vplyv vlastností pôd, do ktorých je biouhlie aplikované. V pôdach, ktoré mali vyšší pôvodný obsah Ca²⁺ ako použité biouhlie pozorovali zníženie CEC, pričom táto hodnota klesala so stúpajúcou aplikačnou dávkou biouhlia. Singh a kol. (2022) poukazujú aj na výrazný vplyv teploty pyrolýzy pri posudzovaní výslednej hodnoty CEC. Pyrolyzovaný organický materiál vytvára funkčné skupiny obsahujúce kyslík, ktoré môžu zvýšiť CEC pôdy. Biouhlie produkované pri vysokých teplotách (600 – 700°C) vykazuje vysoko hydrofóbny charakter a vyznačuje sa nižším obsahom funkčných skupín, kvôli dehydratácii a deoxygenácii biomasy. Takýto produkt tak vykazuje potenciálne nižšiu CEC v porovnaní s biouhlím vyrobeným pri nižších teplotách (Tomczyk a kol., 2020). Túto teóriu potvrdzuje aj štúdia od Kloss a kol. (2012). Avšak, Gomez-Eyles a kol. (2013) v dôsledku väčšej mikropórovitosti biouhlia produkovaného pri teplotách nad 600°C naopak uvádzajú zvýšenú hodnotu CEC pôd po jeho aplikácii. Z porovnania uvedených štúdií je zrejmé, že vplyv biouhlia na kationovú výmennú kapacitu pôd (substrátov) zostáva nejasný.

4.1.6. Obsah popola a množstvo organických látok

Obsah organických látok vo všetkých testovaných substrátoch neprekračuje limity odporúčané FLL normou (2018) (Tab.10). Výsledné hodnoty sú taktiež v zhode s výsledkami prezentovanými pre komerčný substrát pripravený na pestovanie rastlín rodu *Sedum* v práci Berretta a kol. (2014).

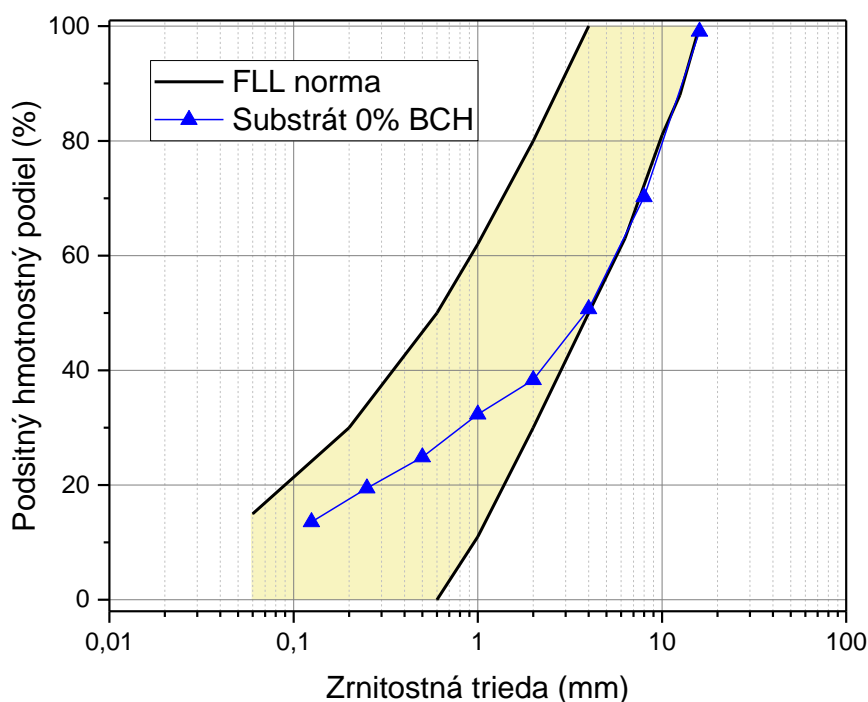
Získané hodnoty nepotvrdzujú výraznejší vplyv prídavku biouhlia na báze čistiarenských kalov na obsah organických látok. Naše výsledky môžu byť ovplyvnené aj použitím nedostatočne veľkej reprezentatívnej vzorky, vzhľadom na veľkosť častíc niektorých frakcií.

Tab. 10. Obsah popola (*AC*) a množstvo organických látok (*OC*) v substrátoch porovnané s FLL (2018).

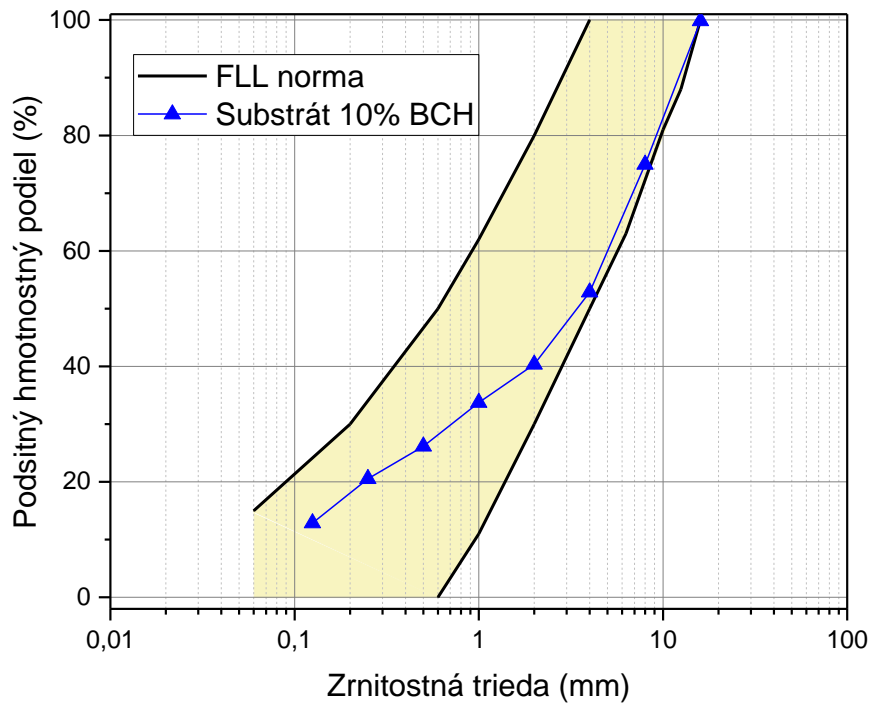
	FLL	bez biouhlia	10% biouhlia	20% biouhlia
<i>AC</i> (%)	≥ 93,5	97,3 ± 0,3	97,1 ± 0,5	97,5 ± 0,5
<i>OC</i> (%)	≤ 6,5	2,7 ± 0,3	2,9 ± 0,5	2,5 ± 0,5

4.1.7. Zrnitostné zloženie substrátov

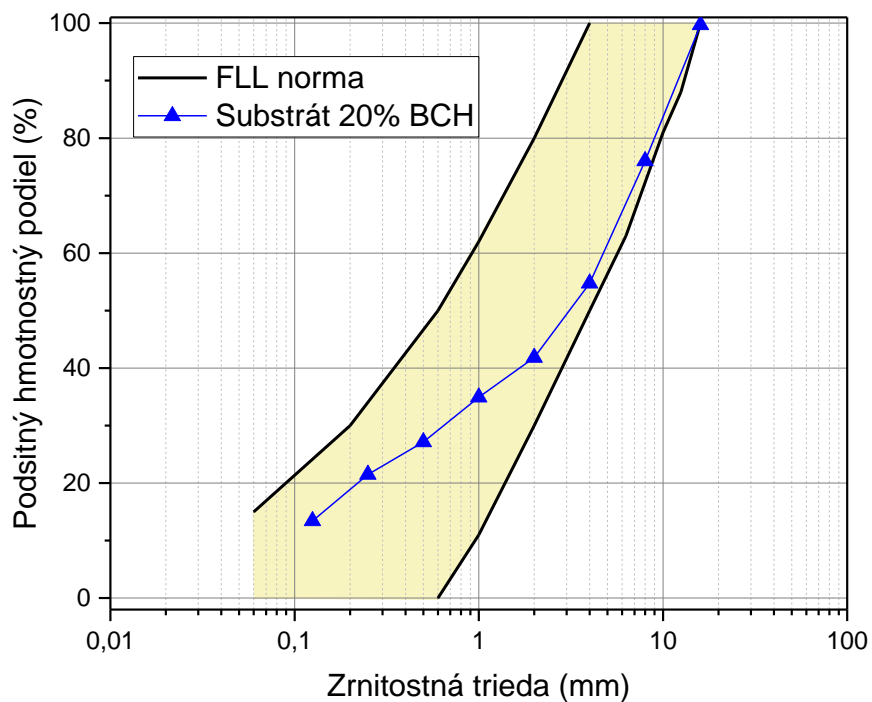
Rastový substrát tvorí zmes zložiek navrhnutých tak, aby vyhovoval špecifickým požiadavkám pri prevádzkovaní zelených striech. Tento typ substrátov by mal vykazovať viac menej súvislý rozsah veľkosti častíc, aby sa minimalizovala možnosť kompresie substrátu (ASTM International E2777 – 14, 2014). Preto FLL (2018) uvádza distribúciu veľkosti častíc pre všetky strešné systémy formou kriviek zrnitosti, pričom súradnice zobrazujú hranice rozsahu hmotnostného podielu v danej zrnitostnej triede. Krivky zrnitosti nami testovaných substrátov porovnané s odporúčanými hodnotami pre viacvrstvové strešné substráty sú zobrazené na obrázkoch 16, 17, 18. Z uvedených kriviek zrnitosti je zrejmé, že distribúcia veľkosti častíc všetkých testovaných substrátov spadá do odporúčaného rozsahu definovaného FLL normou. Prídavok biouhlia pritom zvyšuje obsah jemnejších častíc, čím sa celková distribúcia častíc normalizuje a lepšie zapadá medzi distribučné krivky.



Obr. 16. Krivka zrnitosti komerčného strešného substrátu (▲). Žltá farba predstavuje rozsah zrnitosti uvádzaný normou FLL (2018).



Obr. 17. Krivka zrinitosti komerčného strešného substrátu s 10% prídavkom biouhlia (▲).
Žltá farba predstavuje rozsah zrinitosti uvádzaný normou FLL (2018).



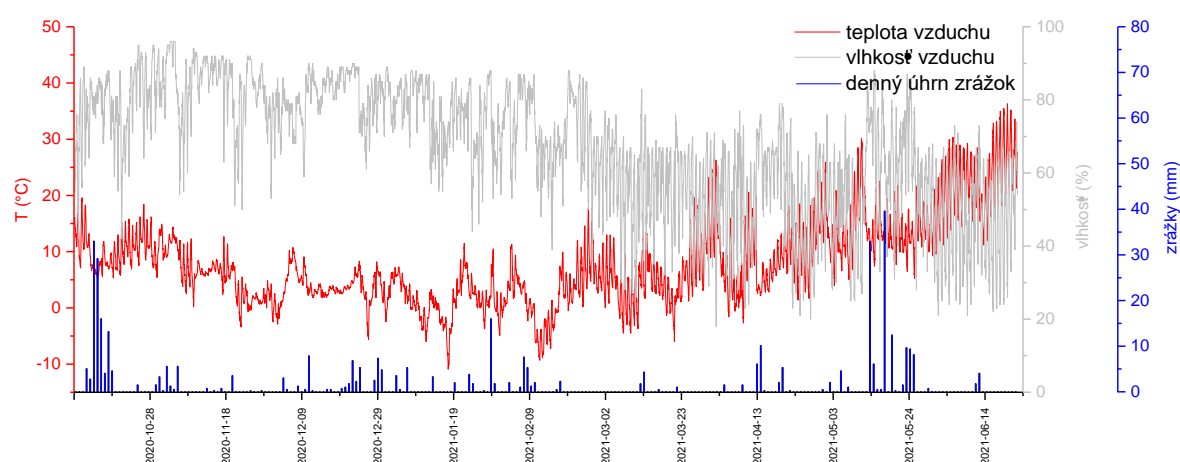
Obr. 18. Krivka zrinitosti komerčného strešného substrátu s 20% prídavkom biouhlia (▲).
Žltá farba predstavuje rozsah zrinitosti uvádzaný normou FLL (2018).

Z vyššie uvedených výsledkov testovania komerčného extenzívneho strešného substrátu a substrátov modifikovaných prídavkom pyrolyzovaných čistiarenských kalov

v laboratórnych podmienkach je zrejmé, že všetky spĺňajú minimálne požiadavky pre strešné substráty ako ich definuje FLL norma (FLL, 2018). Ideálny extenzívny viacvrstvový substrát by mal vykazovať maximálnu vodnú kapacitu (VK) vyššiu ako 35%, obsah vzduchu pri VK >10% a vodopriepustnosť v rozsahu 0,6 – 70 mm min⁻¹. Prídavok biouhlia v množstve 10 a 20 % (v/v) zlepšuje uvedené kľúčové parametre komerčného substrátu a navyše znižuje aj jeho objemovú hmotnosť v suchom stave. Zaujímavou vlastnosťou biouhlia je aj jeho sorpčná charakteristika. Substráty s biouhlím vykazovali nižšie hodnoty celkových rozpustených látok a nižšiu vodivosť. To naznačuje jeho schopnosť zadržiavať živiny i prípadné kontaminanty a eliminovať tak sekundárne znečistenie odtekajúcej dažďovej vody. Uvedené charakteristiky sme overili aj v reálnych podmienkach – na streche.

4.2. Charakteristika pripravených strešných substrátov v reálnych podmienkach

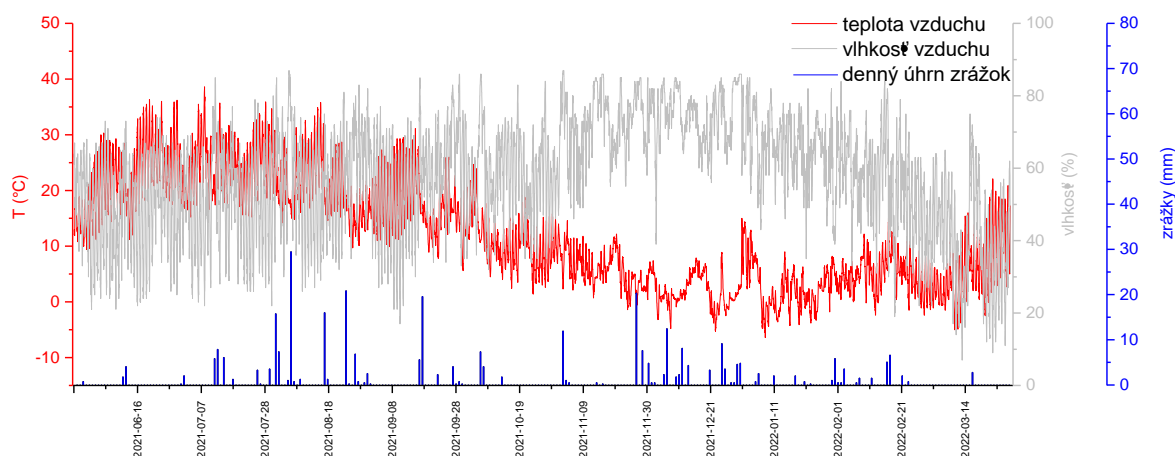
Experimentálne zelené plochy sme inštalovali na streche budovy PdF TU v Trnave. Celkovo oblasť mesta Trnava patrí medzi veľmi teplé územia Slovenska, bez priestorovej diferenciácie teplôt vzhľadom k plochému reliéfu, s priemernou ročnou teplotou 9 – 10°C. Priemerný ročný úhrn zrážok sa pohybuje od 400 do 700 mm v závislosti od zrážkových pomerov jednotlivých rokov. Dlhodobý priemer pre mesto Trnava je 560 mm, pričom celkovo patrí oblasť Trnavy medzi zrážkovo deficitné územia. Vietor je najdynamickejším klimatickým prvkom. SZ vietor je výrazne prevládajúcou zložkou vetra vo všetkých ročných obdobiach (predstavuje takmer 25% pozorovaní) (Mesto Trnava, 2014).



Obr. 19. Denný úhrn zrážok (mm), vlhkosť vzduchu (%) a denná teplota (°C) v období od 7.10.2020 do 14.6.2021. Údaje z meteostanice Garni 935 PC umiestnenej v blízkosti experimentálnych zelených plôch.

Vplyv biouhlia na vlastnosti strešných substrátov vystavených reálnym poveternostným podmienkam sme sledovali od 7.10.2020 (založenie experimentu) do 31.3.2022. V tomto období sme celkovo zaznamenali 766,1 mm zrážok, pričom do leta 2021 napršalo 409,9 mm a do ukončenia pozorovania na konci marca ďalších 356,8 mm. Vyššie množstvo zrážok v prvej fáze experimentu sa prejavilo aj na vlhkosti vzduchu, ktorá sa pohybovala v intervale 18-96% s krajnými hodnotami v apríli 2021 a novembri 2020 (Obr. 19). V druhej polovici experimentu sa vlhkosť vzduchu pohybovala v rozmedzí 3-85% (Obr. 20). Extrémne nízke hodnoty vlhkosti vzduchu sme pozorovali v marci 2022.

Zima v druhej fáze experimentu bola výrazne suchšia (vlhkosť vzduchu 55-85%) v porovnaní so zimou v decembri 2020 – marci 2021 (vlhkosť vzduchu 85-90%). Tento jav bol spôsobený jednak nižším množstvom zrážok v zime 2021/2022, ale aj vyššími teplotami v tomto období. Tie sa pohybovali od -6°C do 22°C v porovnaní s teplotami počas prvej sledovanej zimy, kde bol teplotný interval -10°C až 17°C .



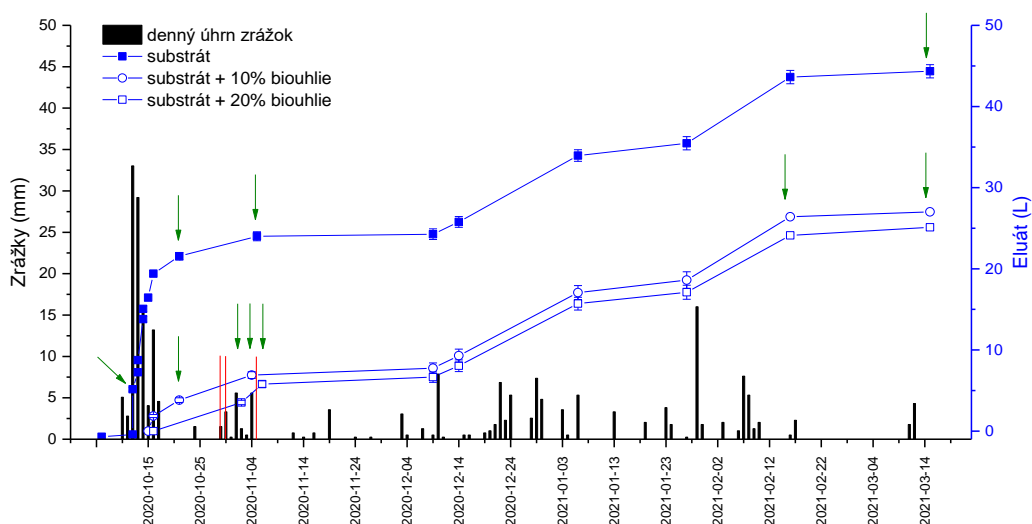
Obr. 20. Denný úhrn zrážok (mm), vlhkosť vzduchu (%) a denná teplota ($^{\circ}\text{C}$) v období od 14.6.2021 do 31.3.2022 Údaje z meteostanice Garni 935 PC umiestnenej v blízkosti experimentálnych zelených plôch.

S cieľom monitorovať vplyv reálnych podmienok sme sledované obdobie rozdelili na 4 časti: jeseň – zima 2020/2021, jar 2021, leto 2021 a jeseň – zima 2021/2022. Uvedené obdobia boli vybrané s ohľadom na významné udalosti ovplyvňujúce celkové charakteristiky experimentálnych zelených plôch.

4.2.1. Vodozadržná kapacita extenzívnych substrátov

Experimentálne zelené plochy v boxoch sú tvorené viacvrstvou skladbou: (1) drenážnou vrstvou Nophadrain ND 100, ktorej súčasťou je tlakovo-roznášajúca vrstva

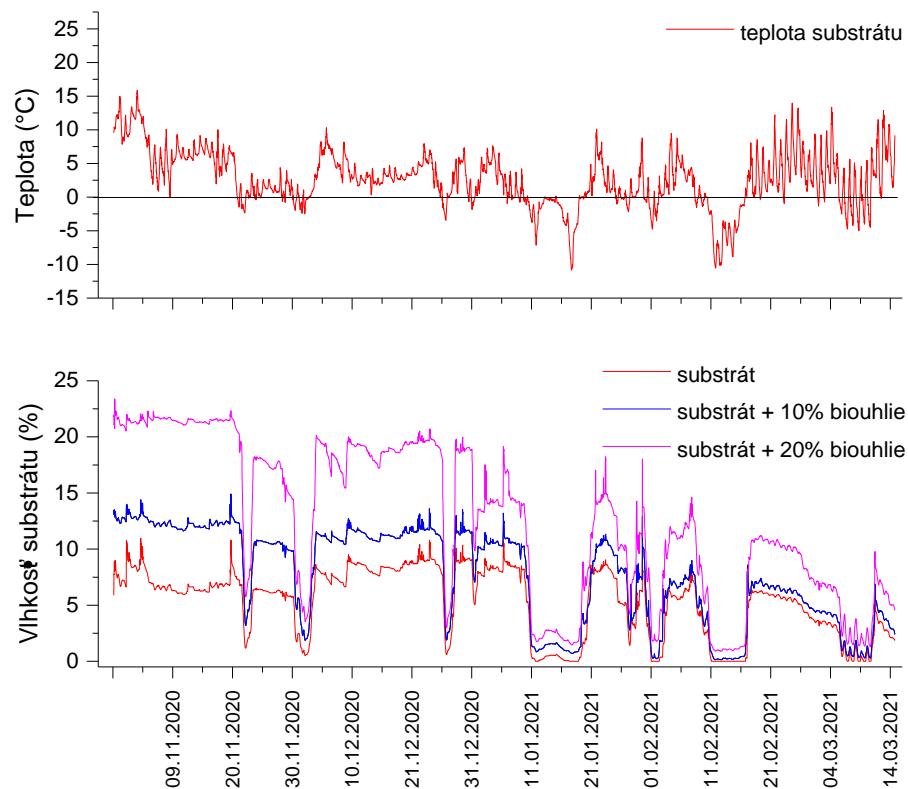
a filtračná geotextília a (2) 8 cm vrstvou extenzívneho substrátu s a bez prídavku biouhlia s vysadenými rastlinami rodu *Sedum*. Z výsledkov uvedených na Obr. 21 - 28 a v Tabuľke 11 je zrejmé, že aplikácia biouhlia na báze čistiarenských kalov zvyšuje vodozadržnú kapacitu extenzívnych viacvrstvových substrátov počas celého sledovaného obdobia, a to v závislosti od stúpajúceho obsahu biouhlia v substrátoch. Tento výsledok je v súlade s výsledkami získanými v laboratórnych podmienkach, kde sme potvrdili vyššie hodnoty maximálnej vodnej kapacity substrátov obsahujúcich biouhlie v porovnaní s komerčným substrátom (Tab. 5). Potvrdzujú to aj zistenia ďalších autorov (Cao a kol., 2014; Gan a kol., 2021; Hussain a Ravi, 2021; Kuoppamäki a kol., 2016), ktorí uvádzajú pozitívny vplyv prídavku biouhlia na vodozadržnú schopnosť zelených striech.



Obr. 21. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v období jeseň – zima od 7.10.2020 do 15.3.2021. Červené stĺpce - dažďová voda pridaná do substrátov s prídavkom biouhlia (10 mm pridaných do substrátu s 10% biouhlia; 30 mm pridaných do substrátu s 20% biouhlia). Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Jesenno-zimné obdobia sú charakteristické nižšími teplotami a pravidelnejšími zrážkami (Obr. 21 a 27). Substráty preto zostávajú vlhké a znižuje sa ich vodozadržná kapacita v porovnaní s letom (Tab. 11). Avšak, vodozadržná kapacita v nami pozorovaných chladnejších obdobiach sa výrazne líši. Výsledky z jesene 2020 sú ovplyvnené silnými zrážkami na začiatku októbra (Obr. 21), pričom klesajúce teploty, nízka transpirácia rastlinami a nízky výpar zo substrátov (Kuoppamäki a kol., 2016) spôsobili, že substráty zostali nepretržite vlhké a znížila sa ich zadržná kapacita v danom období. Celkové

množstvo prijatých zrážok substrátmi sa v tomto období líši z dôvodu postupného zakladania experimentálnych plôch. Vzniknutý rozdiel sme z časti znížili pridaním odchytenej dažďovej vody do substrátov obohatených biouhlím (červené stĺpce, Obr. 21). Vlhkosť substrátov začala znova klesať až koncom februára a to najmä v dôsledku rastúcich teplôt (Obr. 22). Je zrejmé, že počas celého sledovaného obdobia vykazovali vyššiu vlhkosť substráty s prídavkom biouhlia v porovnaní s komerčným substrátom.



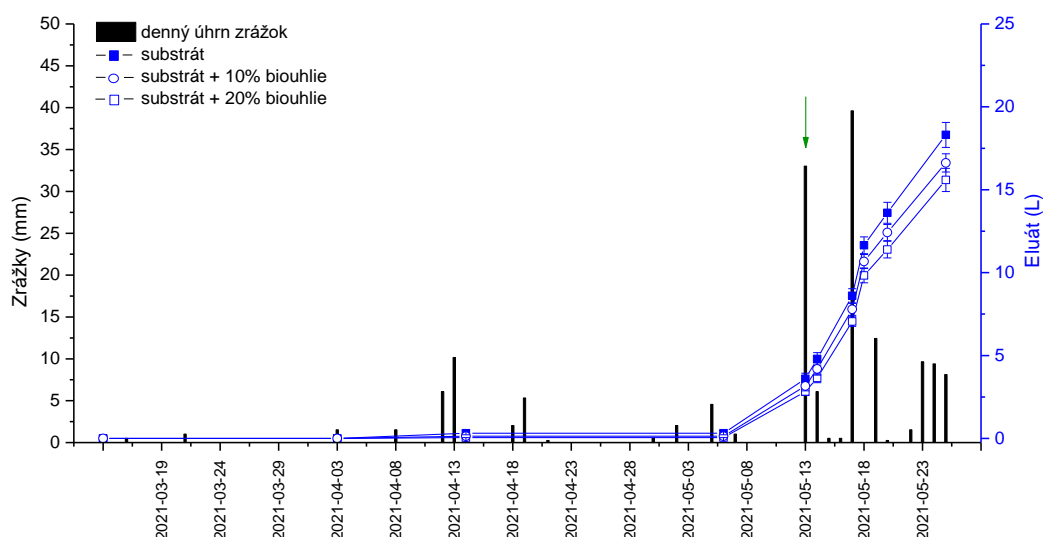
Obr. 22. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (- - -) prídavkom biouhlia v období jeseň – zima od 30.10.2020 do 15.3.2021. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Pomerne vysoké teploty vzduchu sme sledovali v neskorom jarnom období 2021 (Obr. 19), čo sa prejavilo aj na vysokých teplotách substrátu (Obr. 24). Toto obdobie bolo ovplyvnené dvoma silnými dažďami v polovici mája (Obr. 23), po ktorých sa substráty nestihli zregenerovať. Vodou nasiaknuté substráty, tak na konci tohto obdobia zadržali menej vody, a to aj napriek predchádzajúcemu dlhému obdobiu sucha. To potvrdzujú aj čiastkové údaje o množstve eluátu z tohto obdobia, kedy počas dažďa 13.5.2021 dopadlo 31 mm zrážok a z experimentálnych zelených plôch odtieklo v priemere 2,8 L (substrát + 20% biouhlia), 3,0 L (substrát + 10% biouhlia) a 3,3 L (komerčný substrát) eluátu. Následne po ďalšej významnej zrážkovej udalosti, kedy opäť dopadlo asi 39 mm zrážok, už substráty

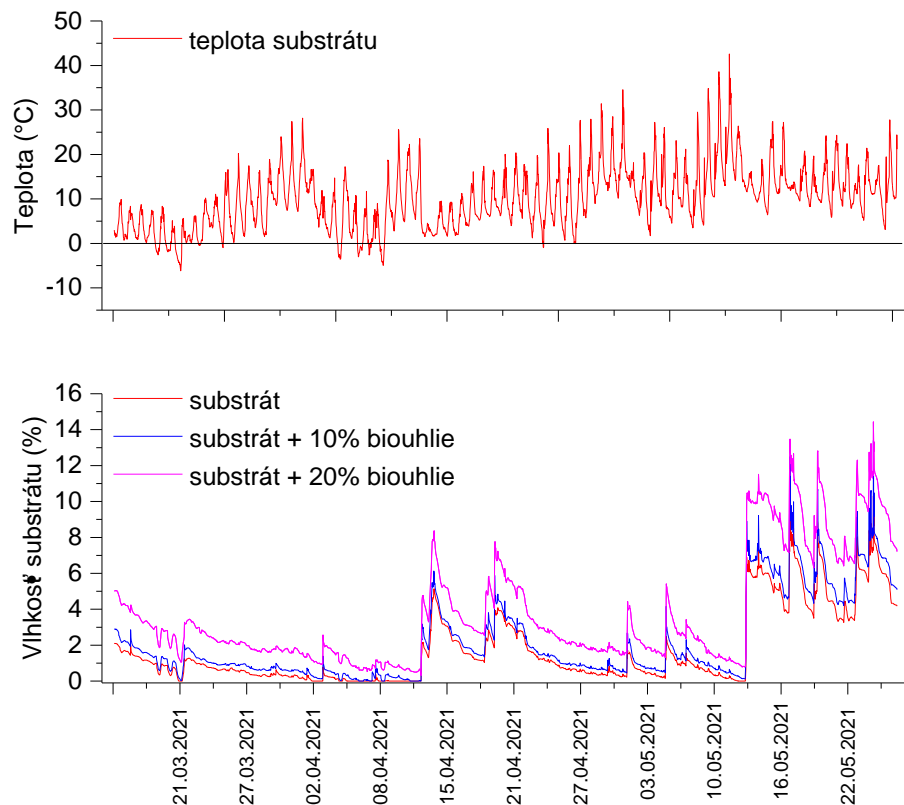
nedokázali zadržať dostatok vody, a to ani počas menších dažďov pred a po 23.5.2021. V porovnaní s prvým intenzívnym dažďom sme tak z 39 mm dopadnutých zrážok 23.5.2021 zaznamenali priemerne 4,2 L (oba substráty s prídavkom biouhlia) a 4,7 L (komerčný substrát) eluátu (Obr. 23). Aj napriek intenzívnym privalovým zrážkam sa vodozadržná kapacita substrátov v sledovanom období pohybovala od 45,1 do 53,3 % (Tab. 11).

Tab. 11. Celkové množstvo zrážok (mm a L), eluátu (L) a vodozadržná kapacita (%) extenzívnych strešných substrátov bez a s prídavkom biouhlia (B) v období od októbra 2020 do marca 2022.

Sledované obdobie	Strešný substrát	Celkové zrážky (mm)	Celkové zrážky (L)	Eluát (L)	Zadržná kapacita (%)
Jeseň – zima október 2020 – marec 2021	substrát	251,7	53,08	44,45	16,3
	substrát + 10%B	182,7	38,55	27,01	29,9
	substrát + 20%B	180,9	38,17	25,1	34,2
Jar marec 2021 – máj 2021	substrát			18,31	45,1
	substrát + 10%B	158,2	33,38	16,62	50,2
	substrát + 20%B			15,59	53,3
Leto – jeseň jún 2021 – október 2021	substrát			12,54	68,9
	substrát + 10%B	190,9	40,28	11,04	72,6
	substrát + 20%B			9,44	76,6
Jeseň – zima október 2021 – marec 2022	substrát			14,84	57,5
	substrát + 10%B	165,3	34,88	14,52	58,4
	substrát + 20%B			13,85	60,3

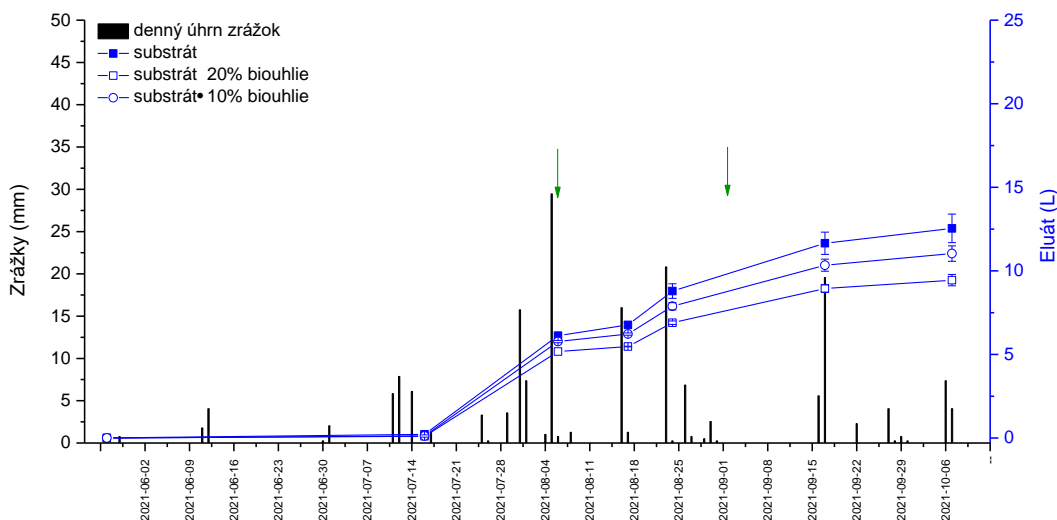


Obr. 23. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v jarnom období od 15.3.2021 do 25.5.2021. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

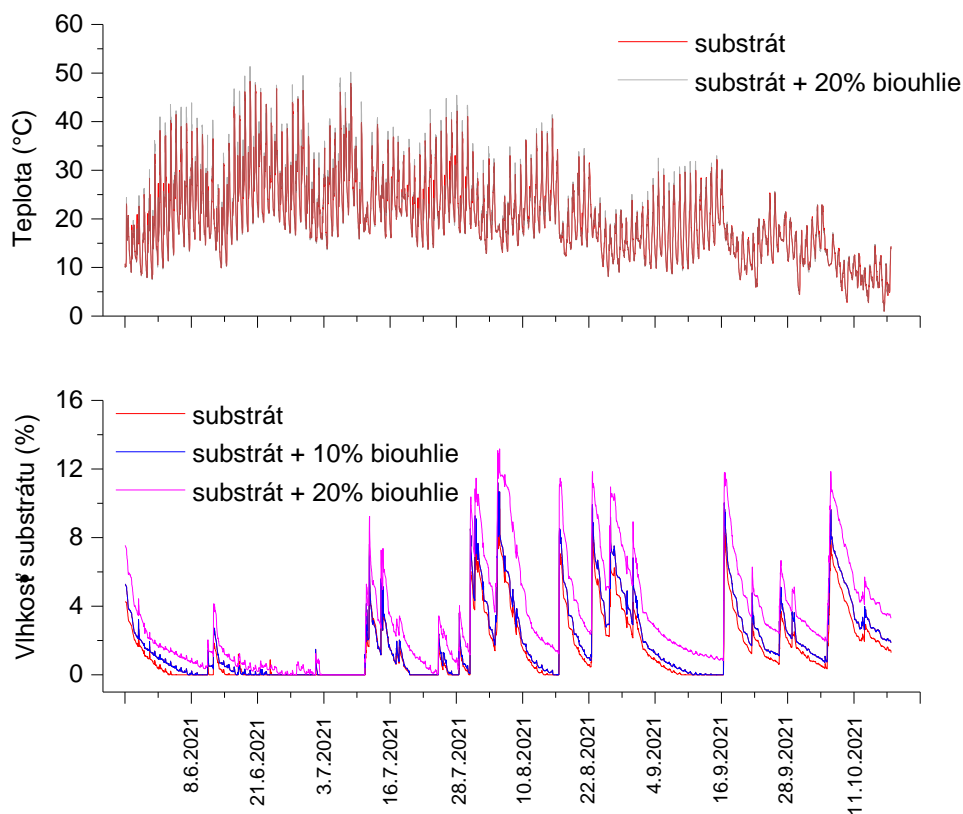


Obr. 24. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (---) prídavkom biouhlie v jarnom období od 15.3.2021 do 28.5.2021. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Vodozadržná kapacita experimentálnych zelených plôch bola najvýraznejšia v období leto – jeseň 2021 (Tab. 11, Obr. 25). Tento jav je ovplyvnený aj teplotou substrátu, kedy počas leta substráty dosahovali teploty viac ako 50°C (Obr. 26). To spôsobovalo rýchle vysušenie pomerne nízkej vrstvy substrátu medzi jednotlivými zrážkovými udalosťami, čo potvrdzujú aj dáta o vlhkosti substrátov za spomínané obdobie (Obr. 26). Najvyššiu vlhkosť sme opäť zaznamenali v substráte s 20% prídavkom biouhlie, naopak najnižšiu v komerčnom substráte bez biouhlie. Suché substráty tak vykazovali vysokú retenčnú kapacitu v porovnaní s vlhkými substrátmi v chladnejších obdobiach (jeseň – zima 20/21 a 21/22). Celková zádržná kapacita substrátov v sledovanom období sa pohybovala od 68,9 (komerčný substrát) do 76,6 % (substrát + 20% biouhlie, Tab. 11). Zvýšený odtok z experimentálnych plôch sme pozorovali najmä po privalových zrážkach (letné búrky). Aj po nich však vplyvom vysokých teplôt a veterného počasia substráty rýchlo vysychali a vytvárali dostatočnú kapacitu pre opätovné zachytenie ďalších zrážok ako je vidieť z Obr. 26. Naše experimenty potvrdzujú zistenia ďalších autorov, že zloženie a vlastnosti substrátu výrazne ovplyvňujú jeho vodozadržnú kapacitu (Young a kol., 2014; Graceson a kol., 2013).

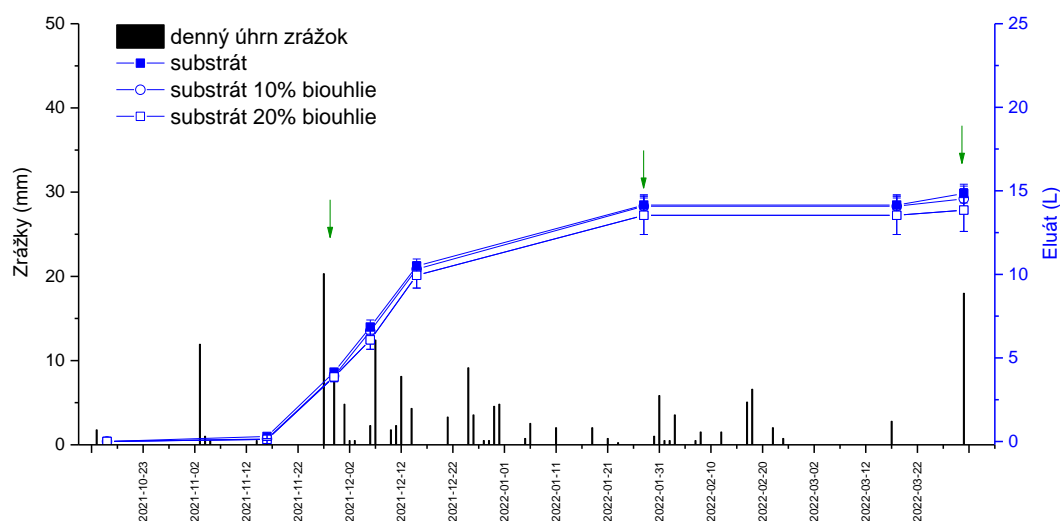


Obr. 25. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlie a zrážky (mm) v období leto – jeseň od 25.5.2021 do 7.10.2021. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.



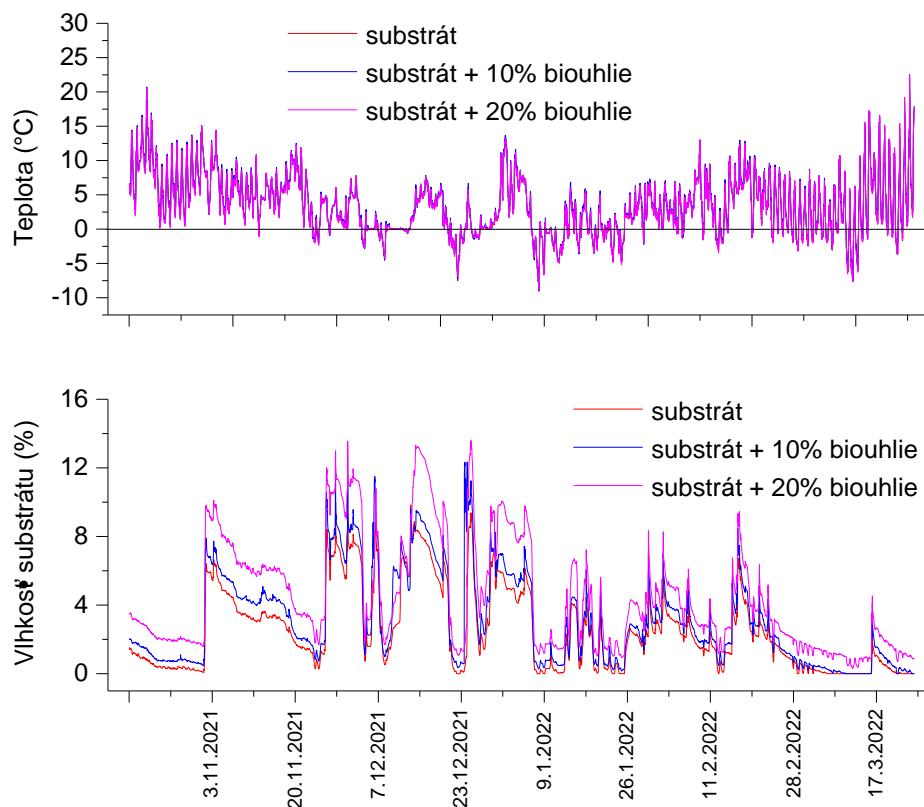
Obr. 26. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (---) prídavkom biouhlie v období leto – jeseň od 28.5.2021 do 17.10.2021. Sensory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Druhé sledované jesenno-zimné obdobie začalo pomerne suchým počasím s nízkou úrovňou vlhkosti substrátov, ktorá začala stúpať a stabilizovať sa tak ako v predchádzajúcom období až koncom novembra (Obr. 28). Substráty tak po predchádzajúcom suchu dokázali zadržať pomerne veľké množstvo zrážok. V tomto období sa už začína pozitívne prejavovať vplyv postupne sa rozrastajúcej vegetácie. Extrémne sucho pokračovalo v marci, kedy SHMÚ (2022) informoval o deficite pôdnej vlahy na západnom Slovensku v rozsahu -60 až -80 mm. Situácia sa zlepšila na konci marca, kedy sme zaznamenali daždivý deň s 18 mm zrážok (Obr. 27). Všetky uvedené udalosti tak výrazne zvýšili retenčnú kapacitu substrátov v porovnaní s predchádzajúcim chladným obdobím. Celková zádržná kapacita substrátov sa pohybovala od 57,5 (komerčný substrát bez biouhlia) do 60,6 % (substrát + 20% biouhlia, Tab. 11).



Obr. 27. Priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech – komerčný substrát (■), s 10% (○) a 20% (□) prídavkom biouhlia a zrážky (mm) v období jeseň – zima od 13.10.2021 do 31.3.2022. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu na analýzu pH, EC a TDS.

Pri porovnaní jednotlivých období je viditeľný vplyv poveternostných podmienok, ako teplota, obdobie sucha či intenzita zrážkových udalostí, na efektivitu aplikácie biouhlia, ako aj na schopnosť samotných zelených striech zadržiavať dažďovú vodu. Napr. na začiatku búrky je aktuálna kapacita zadržania vlhkosti substrátom daná maximálnou vodnou kapacitou substrátu a zvyškovej vlhkosti po predchádzajúcom zrážkovom období (Stovin a kol., 2015). Ako uvádzajú Kuoppamäki a kol. (2016) výsledný efekt biouhlia na retenčnú kapacitu je výraznejší najmä v obdobiach s menším množstvom zrážok v porovnaní s daždivým počasím, kedy je substrát dlhodobo vlhký.

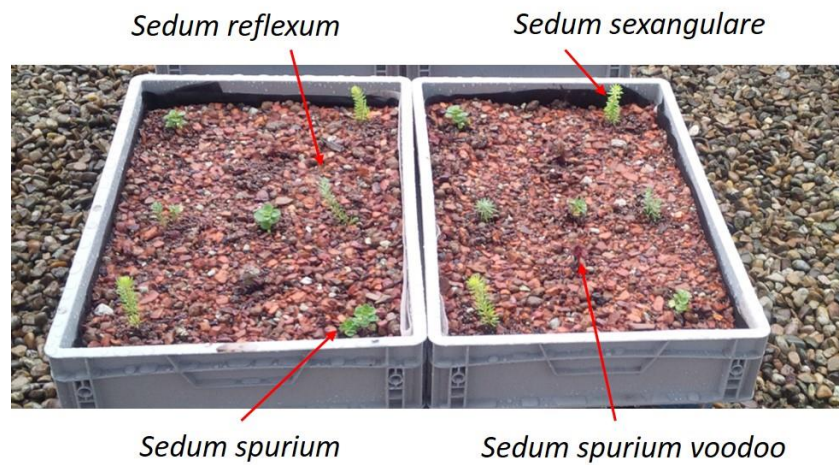


Obr. 28. Priemerná teplota (°C) a vlhkosť komerčného substrátu (---), s 10% (---) a 20% (---) prídavkom biouhlia v období jeseň – zima od 17.10.2021 do 31.3.2022. Senzory pôdnej vlhkosti pracujú iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

4.2.2. Rastlinný pokryv substrátu




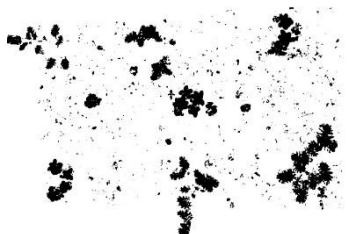


Ako sme uviedli v literárnom prehľade, vegetácia tvorí dôležitú vrstvu, ktorá okrem iného ovplyvňuje aj vodozádržnú kapacitu zelenej strechy. Rastliny rodu *Sedum* sme na experimentálne zelené plochy vysádzali pri založení experimentu v októbri 2020. Do každého boxu s plochou 0,21 m² s extenzívnym strešným substrátom bez a s prídavkom biouhlia sme rovnomerne vysadili 9 rastlín: rozchodník skalný (*S. reflexum*), rozchodník šesťradový (*S. sexangulare*), rozchodník pochybný voodoo (*S. spurium voodoo*) a rozchodník pochybný (*S. spurium*) (Obr. 29). Z Tabuľky 12 a 13 je zrejmy pozitívny vplyv prídavku biouhlia do substrátu na rast rastlín, ktorý pozorovali aj Chen a kol. (2021). Tento efekt biouhlia na báze čistiarenských kalov sme pozorovali počas celého sledovaného obdobia, pričom na základe rastlinného pokryvu najlepšiu výkonnosť vykazoval substrát s 10% prídavkom biouhlia. Táto skutočnosť je zrejme ovplyvnená pozitívnym vplyvom biouhlia na VK a pórovitosť pôdy (vid'. 4.1.1 a 4.1.3.) a vyšším obsahom nutrientov v biouhli. Substrát s 20% prídavkom biouhlia síce dosahoval najvyššie VK, ale v porovnaní so substrátom s 10% biouhlia sa vyznačoval nižším obsahom vzduchu. To spôsobuje

nedostatočné prevzdušnenie koreňov, čo sa odráža aj na výkonnosti rastlín. Preto Latshaw a kol. (2009) odporúčajú, aby polovicu z celkovej pórovitosti substrátu tvoril vzduch.



Obr. 29. Experimentálna zelená plocha s čerstvo vysadenými rastlinami rodu *Sedum*.

Tab. 12. Rastlinný pokryv substrátov bez biouhlia, s 10% a 20% prídavkom biouhlia počas jari 2021.













Dátum	Substrát	Pokryv (%)
15.3.2021	Všetky typy	2,132
	bez biouhlia	  $8,442 \pm 0,870$
27.5.2021	10% biouhlia	  $11,892 \pm 0,100$
	20% biouhlia	  $11,307 \pm 6,163$

Počas jari 2021 sme pozorovali zvýšenie rastlinného pokryvu približne o 6 – 10% (Tab. 12), a to aj napriek dlhému obdobiu bez výraznejších zrážok. Vlhkosť substrátov dosahovala v polovici apríla minimálne hodnoty (Obr. 24), negatívne ovplyvňovalo rast vegetácie. Nektarios a kol. (2021) opakovane pozorovali v máji pokles pokryvu zelenej strechy rastlinami *Sedum* v dôsledku nedostatku vody a nárastu teploty v stredomorskej oblasti. Najväčšie percento pokryvu substrátov rastlinami sme pozorovali v septembri 2021, kedy rastliny v substráte s 10% prídavkom biouhlia pokrývali 28% z celkovej plochy experimentálnej zelenej strechy. V úvode leta sme pritom kvôli vysokým teplotám substrátov (často okolo 40°C) a nevýrazným alebo žiadnym zrážkam zaznamenali 28 dní, kedy substráty vykazovali minimálnu vlhkosť (Obr. 26). Napriek tejto skutočnosti sa rastliny po opätovných zrážkach dokázali zregenerovať. Durhman a kol. (2006) rovnako prezentujú schopnosť rastlín rodu *Sedum* obnoviť svoju aktivitu po 28 dňoch sucha a VanWoert a kol. (2005b) uvádzajú schopnosť regenerácie rastlín *Sedum* až po 88 dňoch sucha.

Po zime 2021/2022 sme opäť zaznamenali pokles rastlinného pokryvu v dôsledku nízkych teplôt a nedostatku slnečného svitu v zimných mesiacoch. Avšak, v porovnaní s prvým po zimným obdobím boli hodnoty pokryvu o 2 – 3% vyššie pre každý typ substrátu.

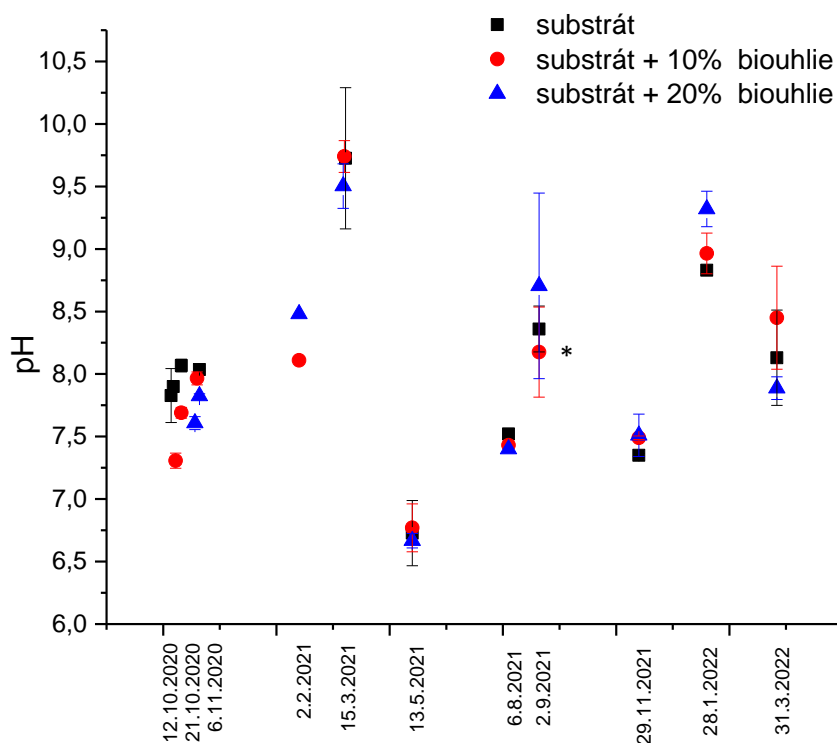
Na základe doteraz získaných údajov môžeme konštatovať, že vegetácia extenzívnych zelených striech sa javí ako trvalo udržateľná aj v pomerne suchom a veľmi teplom území v okolí Trnavy a to bez nutnosti zavlažovania. Vysadené rastliny rodu *Sedum* dokážu obnoviť svoju výkonnosť aj po dlhotrvajúcom období sucha. Spolu so substrátom zabezpečujú veľkú retenčnú kapacitu dažďovej vody aj v prípade silných privalových zrážok, a to najmä vtedy ak je substrát na začiatku dažďa suchý. Efektivita experimentálnych zelených plôch pri znižovaní množstva odtekajúcej dažďovej vody je však viditeľná i v prípade mokrého substrátu, kedy najmä prídavok biouhlia výrazne zlepšuje vodozadržnú kapacitu. Takto upravené substráty ostávajú vlhšie po dlhší čas, čím sa znižujú negatívne dopady dlhodobého sucha na vegetáciu.

Tab. 13. Rastlinný pokryv substrátov bez biouhlia, s 10% a 20% prídavkom biouhlia v obdobiach jeseň 2021 a jar 2022

Dátum	Substrát	Pokryv (%)
29.9.2021	bez biouhlia	  $20,876 \pm 3,752$
	10% biouhlia	  $28,370 \pm 3,909$
	20% biouhlia	  $23,845 \pm 1,421$
23.2.2022	bez biouhlia	  $11,110 \pm 3,970$
	10% biouhlia	  $14,153 \pm 2,286$
	20% biouhlia	  $14,225 \pm 5,514$

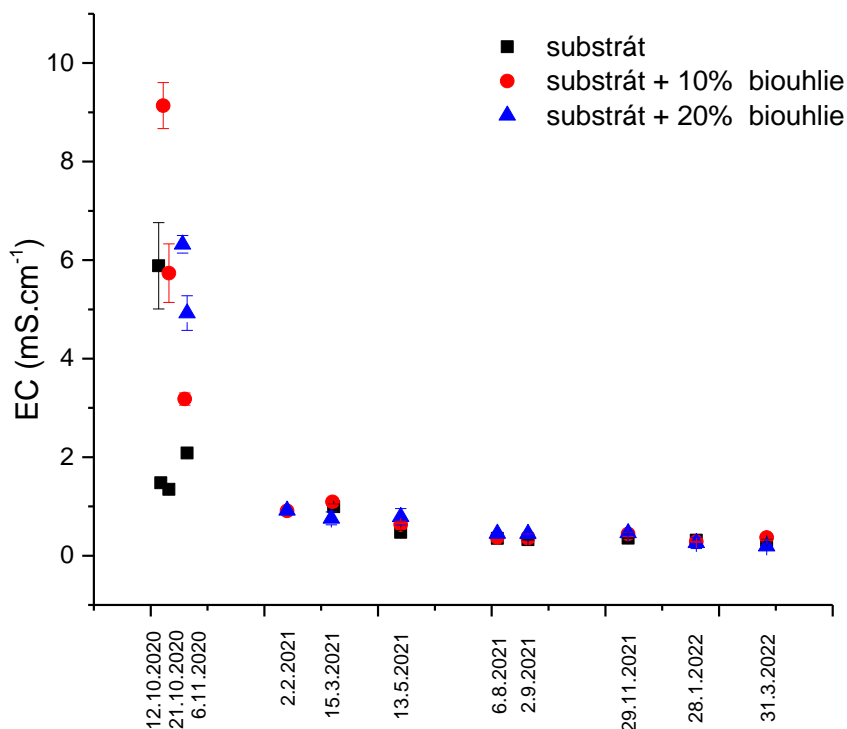
4.2.3. pH, EC a CHSK v eluátoch zo zelených striech

Hodnoty pH odtekajúcej vody z experimentálnych zelených plôch sa počas sledovaného obdobia pohybovali v intervale 6,75 – 9,75 (Obr. 30), pričom tieto sú porovnateľné s hodnotami iných autorov (Teemusk a Mander, 2007; Qianqian a kol., 2019). Je zrejmé, že prídavok pyrolyzovaných čistiarenských kalov do extenzívneho substrátu významnejšie neovplyvňuje pH odtekajúcej vody, čo potvrdzujú aj Qianqian a kol. (2019), ktorí obohatili komerčný substrát biouhlím pripraveným z kokosových škrupín. Zaujímavým javom je opakované signifikantné zvýšenie hodnoty pH po zimných mesiacoch v odtoku zo všetkých substrátov, kedy hodnoty dosahujú úroveň pH 9,0 – 9,75. Vysvetlením by mohol byť efekt zamrznutia a následného rozmrznutia substrátov, kedy má odtekajúca voda vyššiu koncentráciu uhličitanov pochádzajúcich najmä z ľahkých agregátov (Teemusk a Mander, 2007), v našom prípade z keramzitu. Aj vo vzorke vody z 2.9.2021 odtekajúcej zo substrátu s 20% biouhlia sme v porovnaní s predchádzajúcimi meraniami zaznamenali pomerne vysoké hodnoty pH. V danom období nedošlo k zamrznutiu substrátu alebo inej výraznej udalosti, a predpokladáme, že tento jav je pravdepodobne ovplyvnený prítomnosťou rias (* na obr. 30), ktoré mali počas teplého leta a dlhšieho času bez odobratia vzorky eluátu vhodné podmienky na rast.



Obr. 30. Priemerná hodnota pH (\pm SD) eluátov z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) prídavkom biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022. (* signifikantná prítomnosť rias v eluáte).

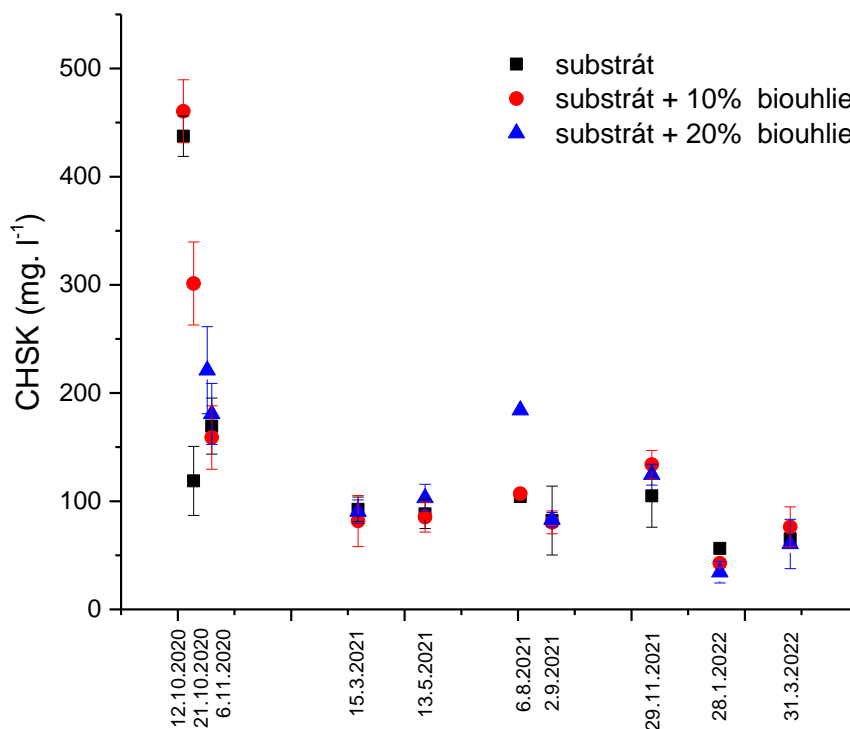
Elektrická vodivosť (EC) počas sledovaného obdobia neustále klesala. Merania z posledných siedmich mesiacov sa ustálili na hodnotách medzi 0,2 – 0,3 mS cm⁻¹ (Obr. 31). Týmto výsledkom sme potvrdili vplyv efektu prvého prietoku, kedy sa z novozaložených zelených striech vyplavuje viac rozpustených látok ako vo vzorkách odobratých neskôr (Berndtsson a kol., 2008). Prídavok biouhlia do substrátov celkovo výraznejšie neovplyvňuje hodnoty EC, uvedený fakt potvrdil aj Qianqian a kol. (2019).



Obr. 31. Priemerné hodnoty elektrickej vodivosti (EC) eluátov (\pm SD) z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022.

Aj hodnoty CHSK (chemickej spotreby kyslíka) odtekajúcej vody postupne klesali (Obr. 32). Najvyššie hodnoty sme opäť zaznamenali počas prvých zrážkových udalostí po založení strešného experimentu, čím sme opäť potvrdili vplyv efektu prvého prietoku (Berndtsson a kol., 2008). CHSK v druhej sledovanej fáze oscilovala v intervale 50 – 120 mg l⁻¹. Ferrans a kol. (2018) vo svojej štúdii prezentujú vplyv intenzity zrážkovej udalosti na výslednú hodnotu CHSK v eluáte. Pri slabších zrážkach zaznamenali v eluáte vyššie koncentrácie CHSK ako pri silnejších búrkach. Naše pozorovania však naznačujú iný priebeh. V eluátoch odobratých po silnejších búrkach, kedy nárazovo napršalo 20 – 30 mm zrážok (6.8.2021, 29.11.2021, 31.3.2022) sme zaznamenali mierne zvýšenú hodnotu CHSK

v porovnaní so vzorkami odobratými po slabších a pravidelnejších zrážkach (2.9.2021, 28.1.2022). CHSK vo vzorkách odobratých po nárazových zrážkach pritom stúpa v závislosti od výdatnosti dažďa. Zvýšené hodnoty CHSK sú spôsobené primárne organickým materiálom v substrátoch. Avšak, substrát nie je jediným zdrojom zvýšenej spotreby kyslíka v eluáte. Ďalším faktorom môže byť vtáčí trus alebo prachové znečistenie antropogénneho pôvodu (automobilová doprava). Preto hodnoty CHSK získané zo zelených striech závisia aj od lokality výskytu danej strechy (Adamiak, 2020).



Obr. 32. Priemerná chemická spotreba kyslíka (CHSK) v eluátoch (\pm SD) z experimentálnych zelených striech s komerčným substrátom (■), s 10% (●) a 20% (▲) biouhlia v období od 7.10.2020 do 31.3.2022.

Hoci zelené strechy poskytujú v mestách mnohé benefity ako znižovanie vplyvu mestských tepelných ostrov či zadržiavanie zrážkových vôd, je nevyhnutné sledovať aj kvalitu odtekajúcej vody. K faktorom ovplyvňujúcim zloženie odtekajúcej vody patrí zloženie substrátu, jeho hĺbka, vlastnosti vegetácie, údržba strechy, dynamika zrážok a lokálne znečistenie. Nami získané výsledky naznačujú, že je potrebné pravidelné hodnotenie kvality odtekajúcej vody, a to nielen po založení strechy ale aj po intenzívnych zrážkach či roztopení zmrznutého substrátu, kedy sa dá očakávať zvýšená koncentrácia nutričov i potenciálne rizikových prvkov.

Záver

V uvedenej diplomovej práci sme komerčný substrát pripravený firmou JV INTERSAD, s.r.o. modifikovali 10% a 20% prídavkom biouhlia na báze čistiarenských kalov. V laboratórnych podmienkach sme stanovili fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti všetkých pripravených substrátov. Komerčný substrát aj modifikované substráty spĺňajú hodnoty stanovené FLL normou, pričom prídavok biouhlia výrazne zlepšuje viacerov testovaných charakteristík komerčného substrátu. Substráty s biouhlím majú takmer o 9% nižšiu objemovú hmotnosť, signifikantne vyššiu maximálnu vodnú kapacitu a pórovitosť, vďaka čomu sa javia ako vhodnejšie rastové médiá pre rast rastlín zelených striech. Vyššie hodnoty pH a nižšie hodnoty EC a TDS vo výluhoch z modifikovaných substrátov zároveň naznačujú zvýšenú pufrovaciu schopnosť a adsorpčné vlastnosti biouhlia.

Z takto charakterizovaných substrátov sme zostavili experimentálne zelené strechy, ktoré boli vystavené reálnym podmienkam. Na strechu PdF TU v Trnave sme postavili 12 boxov s extenzívnymi substrátmi bez a s prídavkom biouhlia a v období od októbra 2020 do apríla 2022 sledovali ich vplyv na retenčnú kapacitu dažďovej vody, rast rastlín a kvalitu odtekajúcej dažďovej vody (EC, pH a CHSK). Substráty modifikované biouhlím majú výrazne vyššiu vodozadržnú kapacitu, čím zvyšujú vlhkosť substrátov. Celková vodozadržná kapacita substrátov v sledovanom období sa pohybovala od 68,9 (komerčný substrát) do 76,6 % (substrát + 20% biouhlia). Aj vďaka tomu má substrát s 10% biouhlia najvýraznejší vplyv na rast vegetácie. V terénnom experimente nebol výrazný vplyv biouhlia na kvalitu odtekajúcej dažďovej vody.

Prezentované výsledky naznačujú, že aplikácia biouhlia z čistiarenských kalov v množstve 10 a 20% zlepšuje kľúčové vlastnosti komerčného extenzívneho viacvrstvého strešného substrátu, čím pozitívne ovplyvňuje vodozadržnú kapacitu ale aj rast a vývin vegetácie zelených striech.

Zoznam použitej literatúry

BURSZTA-ADAMIAK, E. 2020. The influence of green roofs on runoff quality — 6 years of experience. In *Distillation and Water Treatment*. ISSN 1944-3986, 2020, vol. 186, p. 394-405.

AKTHER, M. a kol. 2021. Nutrient leaching behavior of green roofs: Laboratory and field investigations. In *Science of The Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2021, vol. 754, 141841.

ARABI, R. a kol. 2015. Considerations for Plant Selection in Green Roofs. In *Alam Cipta*. ISSN 1823-7231, 2015, vol. 8, no. 3, p. 10-17.

ASQ GARDEN AND LANDSCAPE, 2021. Crushed Brick 10 mm. <<https://www.asq.net.au/crushed-brick-10mm-fcr>>, [2021-09-22].

ASTM E2777 – 14, 2014. Standard Guide for Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International.

ASTM E2974 – 13, 2013. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM International.

BADO, S. a kol. 2016. *Protocols for Pre-Field Screening of Mutants for Salt Tolerance in Rice, Wheat and Barley*. Berlín : Springer International Publishing, 2016. 37 s. ISBN 978-3-319-26590-2.

BATES, A. J. a kol. 2015. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. In *Landscape and Urban Planning*. ISSN 0169-2046, 2015, vol. 135, p. 22-31.

BATES, A. J. – SADLER, J. P. – MACKAY, R. 2013. Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. In *Urban Forestry & Urban Greening*. ISSN 1618-8667, 2013, vol. 12, no. 1, p. 98-108.

BECK, D. A. – JOHNSON, G.R. – SPOLEK, G. A. 2011. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. In *Environmental Pollution*. ISSN 0269-7491, 2011, vol. 159, no. 8 – 9, p. 2111-2118.

BEECHAM, S. – RAZZAGHMANESH, M. 2015. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. In *Water Research*. ISSN 0043-1354, 2015, vol. 70, p. 370-384.

BEESELEY, L. a kol. 2013. Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). In *Science of The Total Environment*. ISSN: 0048-9697, 2013, vol. 454-455, p. 598–603.

BERRETTA, C. – POË, S. – STOVIN, V. 2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. In *Journal of Hydrology*, ISSN 0022-1694, 2014, vol. 511, p. 374-386.

- BERNDTSSON, J. C. – BENGTSSON, L. – JINNO, K. 2008. First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events. In *Hydrology Research*. ISSN 1998-9563, 2008, vol. 39, no. 3, p. 171-179.
- BERNDTSSON, J. C. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2010, vol. 36, no. 4, p. 351-360.
- BIANCHINI, F. – HEWAGE, K. 2012. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. In *Building and Environment*. ISSN 0360-1323, 2012, vol. 48, p. 57-65.
- BLISS, D. J. – NEUFELD, R. D. – RIES, R. J. 2009. Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. In *Environmental Engineering Science*. ISSN 1092-8758, 2009, vol. 26, no. 2, p. 407-418.
- BOIVIN, MA. a kol. 2001. Effect of Artificial Substrate Depth on Freezing Injury of Six Herbaceous Perennials Grown in a Green Roof System. In *HortTechnology*. ISSN 1943-7714, 2001, vol. 11, no. 3, p. 409-412.
- BOLLMAN, M. A. a kol. 2019. A framework for optimizing hydrologic performance of green roof media. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2019, vol. 140, 105589.
- BOUSSELOT, J. M. – KLETT, J. E. – KOSKI, R.D. 2011. Moisture Content of Extensive GreenRoof Substrate and Growth Responseof 15 Temperate Plant Speciesduring Dry Down. In *van* 2011, vol. 46, no. 3, p. 518-522.
- CAO, C. T. N. a kol. 2014. Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2014, vol. 71, p. 368-374.
- CARRILLO, L. – JAUCH, M. – MEINKEN, E. 2012. Determination of Substrate Quality for Extensive Green Roof According to FLL Guideline. In *Acta Horticulturae*. ISSN 2406-6168, 2012, vol. 938, p. 431-436.
- CASCONE, S. a kol. 2018. The evapotranspiration process in green roofs: A review. In *Building and Environment*. ISSN 0360-1323, 2019, vol. 147, p. 337-355.
- CASCONE, S. 2019. Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials. In *Sustainability*. ISSN 2071-1050, 2019, vol. 11, no. 11, 3020.
- CASTLETON, H.F. a kol. 2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. In *Energy and Buildings*. ISSN 0378-7788, 2010, vol. 42, no. 10, p. 1582-1591.
- CHEN, H. a kol. 2018a. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. In *Science of the Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2018, vol. 635, p. 333-342.
- CHEN, H. a kol. 2018b. Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs. In *Forests*. ISSN 1999-4907, 2018, vol. 9, no. 7, 413.

CHEN, H. a kol. 2021. Biochar Improves Sustainability of Green Roofs via Regulate of Soil Microbial Communities. In *Agriculture*. ISSN 2077-0472, 2021, vol. 11, no. 7, p. 1-12.

CLARK, C. – BUSIEK, B. – ADRIAENS, P. 2010. Quantifying Thermal Impacts of Green Infrastructure: Review and Gaps. In *Proceedings of the Water Environment Federation*. ISSN 1938-6478, 2010, vol. 2010, no. 2, p. 69–77.

CRISTEA, N. C. – KAMPF, S. K. – BURGESS, S. J. 2013. Revised Coefficients for Priestley-Taylor and Makkink-Hansen Equations for Estimating Daily Reference Evapotranspiration. In *Journal of Hydrologic Engineering*. ISSN 1943-5584, 2013, vol. 18, no. 10, p. 1289-1300.

DAI, Z. a kol. 2014. The Effects and Mechanisms of Soil Acidity Changes, following Incorporation of Biochars in Three Soils Differing in Initial pH. In *Soil Science Society of America Journal*. ISSN 1435-0661, 2014, vol. 78, no. 5, p. 1606-1614.

DALAHMEH, S. a kol. 2018. Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. In *Science of The Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2018, vol. 612, p. 192-201.

DAS, S. K. – GHOSH, G. K. – AVASTHE, R. 2020. Applications of biomass derived biochar in modern science and technology. In *Environmental Technology & Innovation*. ISSN: 2352-1864, 2020, vol. 21, 101306.

DATTA, S. – TAGHVAEIAN, S. – STIVERS, J. V. 2017. Understanding Soil Water Content and Thresholds For Irrigation Management. In Oklahoma Cooperative Extension Service, Oklahoma State University, BAE-1537, 8 pp.

DEEM, L. M. – CROW, S. E. 2017. Biochar. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. USA : Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-409548-9.

DE-VILLE, S. a kol. 2017. The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. In *Journal of Hydrology*. ISSN 0022-1694, 2017, vol. 547, p. 332-344.

DURHMAN, A. K. – ROWE, D. B. – RUGH, C. L. 2006. Effect of Watering Regimen on Chlorophyll Fluorescence and Growth of Selected Green Roof Plant Taxa. In *HortScience*. ISSN 0018-5345, 2006, vol. 41, no. 7, p. 1623-1628.

FARRELL, C. 2016. Use of water-retention additives to improve performance of green roof substrates. In *Acta Horticulturae*. ISSN 2406-6168, 2016, vol. 1108, p. 271-278.

FARRELL, C. – ANG, X. Q. – RAYNER, J. P. 2013. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2013, vol. 52, p. 112-118.

FASSMAN, E. – SIMCOCK, R. 2012. Moisture Measurements as Performance Criteria for Extensive Living Roof Substrates. In *Journal of Environmental Engineering*. ISSN 0733-9372, 2012, vol. 138, no. 8, p. 841–851.

FELLET, G. a kol. 2011. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation. In *Chemosphere*. ISSN 0045-6535, 2011, vol. 83, no. 9, p. 1262-1267.

FERRANS, P. a kol. 2018. Effect of Green Roof Configuration and Hydrological Variables on Runoff Water Quantity and Quality. In *Water*. ISSN 2073-4441, 2018, vol. 10, no. 7, p. 960-978.

FLL, 2018. *Green Roof Guidelines – Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs*. 6. vyd. Bonn : Landscape Development and Landscaping Research Society e.V., 2018. 150 s.

FRANCIS, J. a kol. 2014. *Growing Green Guide : A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia*. Melbourne : Department of Environment and Primary Industries, 2014. 142 s. ISBN 978-1-74326-715-8

FRANCIS, L. F. M. – JENSEN, M. B. 2017. Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. In *Urban Forestry & Urban Greening*. ISSN 1618-8667, 2017, vol. 28, p. 167-176.

FRAZER, L. 2005. Paving Paradise The Peril of Impervious Surfaces. In *Environmental Health Perspectives*. ISSN 1552-9924, 2005, vol. 113, no. 7, p. 456-463.

FRIMPONG, K. A. – ABBAN-BAIDOO, E. – MARSCHNER, B. 2021. Can combined compost and biochar application improve the quality of a highly weathered coastal savanna soil? In *Heliyon*. ISSN 2405-8440, 2021, vol. 7, no. 5, e07089.

FRIŠTÁK, V. a kol. 2013. Sludge of wastewater treatment plants as Co²⁺ ions sorbent. In *Chemical Papers*. ISSN 2585-7290, 2013, vol. 67, no. 3, p. 265-273.

FRIŠTÁK, V. – PIPÍŠKA, M. – GERHARD, S. 2018. Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. In *Journal of Cleaner Production*. ISSN 0959-6526, 2018, vol. 172, p. 1772-1778.

GAN, L. a kol. 2021. Influence of biochar amendment on stormwater management in green roofs: experiment with numerical investigation. In *Acta Geophysica*. ISSN 1895-7455, 2021, vol. 69, p. 2417-2426.

GEORGI, J. N. – DIMITRIOU, D. 2010. The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece. In *Building and Environment*. ISSN 0360-1323, 2010, vol. 45, no. 6, p. 1401-1414.

GETTER, K. L. – ROWE, D. B. 2008. Media depth influences Sedum green roof establishment. In *Urban Ecosystems*. ISSN 1083-8155, 2008, vol. 11, no. 4, p. 361-372.

GLASER, B. a kol. 2001. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. In *Naturwissenschaften*. ISSN 0028-1042, 2001, vol. 88, no. 1, p. 37-41.

GNECCO, I. a kol. 2013. The Role of Green Roofs as a Source/sink of Pollutants in Storm Water Outflows. In *Water Resources Management*. ISSN 1573-1650, 2013, vol. 27, p. 4715-4730.

GOMEZ-EYLES, J. a kol. 2013. The Potential of Biochar Amendments to Remediate Contaminated Soils. In *Biochar and Soil Biota*. USA : CRC Press, 2013. ISBN 9781466576483, p. 100-133.

GONG, K. a kol. 2014. Research on the characteristics of the water quality of rainwater runoff from green roofs. In *Water Science and Technology*. ISSN 0273-1223, 2014, vol. 70, no. 7, p. 1205-1210.

GRACESON, A. a kol. 2013. The water retention capabilities of growing media for green roofs. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2013, vol. 61, p. 328–334.

GRACESON, A. a kol. 2014. Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. In *Biosystems Engineering*. ISSN 1537-5110, 2014, vol. 124, p. 1-7.

GRIFFIN, W. N. 2014. *Extensive Green Roof Substrate Composition: Effects of Physical Properties on Matric Potential, Hydraulic Conductivity, Plant Growth, and Stormwater Retention in The Mid-Atlantic* : diplomová práce. Maryland : Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2014. 172 s.

GRIFFIN, W. N. a kol. 2017. Green Roof Substrate Composition Affects *Phedimus kamtschaticus* Growth and Substrate Water Content under Controlled Environmental Conditions . In *HortScience*. ISSN 0018-5345, 2017, vol. 52, no. 2, p. 320-325.

HAILEGNAW, N. S. a kol. 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. In *Journal of Soils and Sediments*. ISSN 1614-7480, 2019, vol. 19, no. 5, p. 2405-2416.

HONG, N. a kol. 2020. Assessing the effect of surface hydrophobicity/hydrophilicity on pollutant leaching potential of biochar in water treatment. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. ISSN 1226-086X, 2020, vol. 89, p. 222-232.

HANZLÍKOVÁ, J. 2018. *Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy* : diplomová práce. Praha : ČVUT, 2018. 81 s.

HARPER, G. E. a kol. 2015. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2015, vol. 78, p. 127-133.

HASHEMI, S. S. G. – MAHMUD, H. B. – ASHRAF, M. A. 2015. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ISSN 1364-0321, 2015, vol. 52, p. 669-679.

- HOSSAIN, M. K. a kol. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. In *Journal of Environmental Management*. ISSN 0301-4797. 2011, vol. 92, no. 1, p. 223-228.
- HUANG, S. a kol. 2020 Experimental study on the hydrological performance of green roofs in the application of novel biochar. In *Hydrological Processes*. ISSN 0885-6087, 2021, vol. 34, no. 23, p. 4512-4525.
- HUGGINS, T. a kol. 2014. Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells. In *Bioresource Technology*. ISSN 0960-8524, 2014, vol. 157, p. 114-119.
- HUSSAIN, R. – RAVI, K. 2021. Investigating unsaturated hydraulic conductivity and water retention characteristics of compacted biochar-amended soils for potential application in bioengineered structures. In *Journal of Hydrology*. ISSN 0022-1694, 2021, vol. 603, 127040.
- IMHOFF, M. L. a kol. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. In *Remote Sensing of Environment*. ISSN 0034-4257, 2010, vol. 114, no. 3, p. 504-513.
- JAUCH, M. & FISCHER, P. 2000b. Substrate im Dauertest. Deutscher Gartenbau, DeGa Spezial "GaLaBau Dachbegrünung". Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- JOBIN, P. a kol. 2004. Impact of two hydrophilic acrylic-based polymers on the physical properties of three substrates and the growth of *Petunia × hybrida* 'Brilliant Pink'. In *Journal of the American Society for Horticultural Science*. ISSN 2327-9788, 2006, vol. 129, no. 3, p. 449-457.
- KARCZMARCZYK, A. – BUS, A. – BARYLA, A. 2018. Phosphate Leaching from Green Roof Substrates—Can Green Roofs Pollute Urban Water Bodies?. In *Water*. ISSN 2073-4441, 2018, vol. 199, no. 10, p. 1-13.
- KLOSS, S. a kol. 2012. Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties. In *Journal of Environment Quality*. ISSN 1537-2537, 2012, vol. 41, no. 4, p. 990-1000.
- KRAWCZYK, A. a kol. 2017. Waste Silica as a Valuable Component of Extensive Green-Roof Substrates. In *Polish Journal of Environmental Studies*. ISSN 2083-5906, 2017, vol. 26, no. 2, p. 643-653.
- KUOPPAMÄKI, K. a kol. 2016. Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2016, vol. 88, p. 1-9.
- KUOPPAMÄKI, K. – LEHVÄVIRTA, S. 2016. Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. In *Landscape and Urban Planning*. ISSN 0169-2046, 2016, vol. 152, p. 39-48.

- LAL, R. 2010. Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. In *BioScience*. ISSN 1525-3244, 2010, vol. 60, no. 9, p. 708-721.
- LATSHAW, K. – FITZGERALD, J. – SUTTON, R. 2009. Analysis of Green Roof Growing Media Porosity. In *RURALS: Review of Undergraduate Research in Agricultural and Life Sciences*. ISSN 1559-3339, 2009, vol. 4, no. 1, p. 1-9.
- LEHMANN, J. 2007. Bio-energy in the black. In *Frontiers in Ecology and the Environment*. ISSN 1540-9309, 2007, vol. 5, no. 7, p. 381-387.
- LENG, L. a kol. 2019. Biochar stability assessment methods: A review. In *Science of The Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2019, vol. 647, p. 210-222.
- LI, Y. a kol. 2017. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. In *Journal of Soils and Sediments*, ISSN 1614-7480, 2017, vol. 18, no. 2, p. 546-563.
- LIAO, W. – DRAKE, J. – THOMAS, S. C. 2022. Biochar granulation enhances plant performance on a green roof substrate. In *Science of the Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2022, vol. 813, p. 152638.
- LIU, R. a kol. 2020. The influence of extensive green roofs on rainwater runoff quality: a field-scale study in southwest China. In *Environmental Science and Pollution Research*. ISSN 1614-7499, 2020, vol. 27, p. 12932-12941.
- LIU, W. a kol. 2019. The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs. In *Journal of Hydrology*. ISSN 0022-1694, 2019, vol. 576, p. 575-582.
- LUO, H. a kol. 2015. Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. In *Ecological Indicators*. ISSN 1470-160X, 2015, vol. 49, p. 247-259.
- MA, N. a kol. 2016. Biochar Improves Soil Aggregate Stability and Water Availability in a Mollisol after Three Years of Field Application. In *PLOS ONE*. ISSN 1932-6203, 2016, vol. 11, no. 5, p. 1-10.
- MAJOR, J. a kol. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. In *Plant and Soil*. ISSN 1573-5036, 2010, vol. 333, no. 1-2, p. 117-128.
- MENTENS, J. – RAES, D. – HERMY, M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? In *Landscape and Urban Planning*. ISSN 0169-2046, 2006, vol. 77, no. 3, p. 217-226.
- MESTO TRNAVA, 2014. Životné prostredie. <<https://www.trnava.sk/sk/zivotna-situacia/zivotne-prostredie>>, [2022-04-07].
- MOBILANE, 2021. Green roof: MobiRoof ECO. <<https://mobilane.com/en/products/mobiroof/>>, [2021-8-14].

MOHAN, D. a kol. 2014. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. In *Bioresource Technology*. ISSN 0960-8524, 2014, vol. 160, p. 191-202.

MOLINEUX, C. J. – FENTIMAN, C. H. – GANGE, A. C. 2009. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2009, vol. 35, no. 10, p. 1507-1513.

MORAN, A. – HUNT, B. – JENNINGS, G. 2003. A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth. In *World Water and Environmental Resources Congress 2003*. Philadelphia : 2003 American Society of Civil Engineers, 2003. ISBN 9780784406854, p. 1-10.

NAGASE, A. – DUNNETT, N. 2011. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. In *Landscape and Urban Planning*. ISSN 0169-2046, 2011, vol. 103, no. 2, p. 230-236.

NEKTARIOS, P. A. – KOKKINOI, I. – NTOULAS, N. 2021. The effects of substrate depth and irrigation regime, on seeded Sedum species grown on urban extensive green roof systems under semi-arid Mediterranean climatic conditions. In *Journal of Environmental Management*. ISSN 0301-4797, 2021, vol. 279, 111607.

NEMATI, M. R. 2015. Potential Use of Biochar in Growing Media. In *Vadose Zone Journal*. ISSN 1539-1663, 2015, vol. 14, no. 6.

NOYA, M.G. a kol. 2017. Substrates for cultivating herbaceous perennial plants in extensive green roofs. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2017, vol. 102, p. 662-669.

OBERNDORFER, E. a kol. 2007. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. In *BioScience*. ISSN 1525-3244, 2007, vol. 57, no. 10, p. 823-833.

OLLY, L. M. a kol. 2011. An initial experimental assessment of the influence of substrate depth on floral assemblage for extensive green roofs. In *Urban Forestry & Urban Greening*. ISSN 1618-8667, 2011, vol. 10, no. 4, p. 311-316.

ONI, B. A. – OZIEGBE, O. – OLAWOLE, O. O. 2019. Significance of biochar application to the environment and economy. In *Annals of Agricultural Sciences*. ISSN 0570-1783, 2019, vol. 64, no. 2, p. 222-236.

PAETSCH, L. s kol. 2018. Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions. In *Scientific Reports*. ISSN 2045-2322, 2018, vol. 8, no. 1, 6852.

PASSIOURA, J. B. 2002. “Soil conditions and plant growth“. In *Plant, Cell and Environment*. ISSN 1365-3040, 2002, vol. 25, no. 2, p. 311-318.

PETREJE, M. 2021. *Mokřadně-extenzivní vegetační střecha se substrátem s příměsí recyklovaných materiálů* : diplomová práce. Praha : ČVUT, 2021. 97 s.

- QIAN, K. a kol. 2015. Recent advances in utilization of biochar. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ISSN 1364-0321, 2015, vol. 42, p. 1055-1064.
- QIANQIAN, Z. a kol. 2019. Analysis of the effect of green roof substrate amended with biochar on water quality and quantity of rainfall runoff. In *Environmental Monitoring and Assessment*. ISSN 1573-2959, 2019, vol. 191, no. 5, 304.
- REVELL, K. T. – MAGUIRE, R. O. – AGBLEVOR, F. A. 2012. Influence of Poultry Litter Biochar on Soil Properties and Plant Growth. In *Soil Science*. ISSN 0038-075X, 2012, vol. 177, no. 6, p. 402-408.
- RIVASHAA ECO DESIGN SOLUTIONS PVT LTD, 2021. Lightweight Expanded Clay Aggregate. <<https://www.expandedclayaggregate.com/get-product-details/lightweight-aggregate.html>>, [2021-09-22].
- ROWE, D. B. 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. In *Environmental Pollution*. ISSN 0269-7491, 2011, vol. 159, no. 8-9, p. 2100-2110.
- ROWE, D. B. a kol. 2006. Assessment of Heat-expanded Slate and Fertility Requirements in Green Roof Substrates. In *HortTechnology*. ISSN 1943-7714, 2006, vol. 16, no. 3, p. 471-477.
- ROWE, D. B. a kol. 2012. Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. In *Landscape and Urban Planning*. ISSN 0169-2046, 2012, vol. 104, no. 3-4, p. 310-319.
- SANCHEZ, L. – REAMES, T. G. 2019. Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy. In *Urban Forestry & Urban Greening*. ISSN 1618-8667, 2019, vol. 44, 126331.
- SANDOVAL, V. a kol. 2015. Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior. In *Energy Procedia*. ISSN 1876-6102, 2015, vol. 78, p. 1177-1182.
- SEIDL, M. a kol. 2013. Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. In *Environmental Pollution*. ISSN 0269- 7491, 2013, vol. 183, p. 195-203.
- SERC. 2021. Evapotranspiration and Crop Water Use. https://serc.carleton.edu/integrate/teaching_materials/food_supply/student_materials/1091 , [2021-12-27].
- SHMÚ, 2022. Extrémne sucho v marci 2022. <<https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1210>>, [2022-04-06].
- SCHMIDT, H. P. – WILSON, K. 2014. The 55 uses of biochar. In *The Biochar Journal*. 2014, <<https://www.biochar-journal.org/en/ct/2#wtop>> [2022-01-25], ISSN 2297-1114.

SINGH, H. a kol. 2022. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. In *Biochar*. ISSN 2524-7867, 2022, vol. 8, no. 4, p. 1-17.

SINGH, B. P. – COWIE, A. L. – SMERNIK, R. J. 2012. Biochar Carbon Stability in a Clayey Soil As a Function of Feedstock and Pyrolysis Temperature. In *Environmental Science & Technology*. ISSN 0013- 936X, 2012, vol. 46, no. 21, p. 11770-11778.

SONON, L. S. – KISSEL, D. E. – SAHA, U. 2017. Cation Exchange Capacity and Base Saturation. 54
<<https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1040&title=Cation%20Exchange%20Capacity%20and%20Base%20Saturation>>, [2022-4-3].

SPOKAS, K. A. a kol. 2012. Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. In *Journal of Environment Quality*. ISSN 1537-2537, 2012, vol. 41, no. 4, p. 973.

STOVIN, V. a kol. 2015. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2015, vol. 85, p. 159-172.

TAN, X. a kol. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. In *Chemosphere*. ISSN: 0045-6535, 2015, vol. 125, p. 70–85.

TEEMUSK, A. – MANDER, Ü. 2007. Rainwater runoff quantity a quality performance from green roof: The effect of short-term events. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2007, vol. 30, no. 3, p. 271-277.

TOMCZYK, A. – SOKOŁOWSKA, Z. – BOGUTA, P. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. In *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. ISSN 1572-9826, 2020, vol. 19, p. 191-215.

UNFPA. 2016. Urbanization. <<https://www.unfpa.org/urbanization#readmore-expand>>, [2021-11-07].

UNIVERSITY OF MARYLAND. 2021. Green roof system components. <<http://reslife.umd.edu/halls/cambridge/cumberland/greenroof/#>>, [2021-8-14].

URBANOVÁ, J. 2020. *Kompozitné materiály na báze pyrolýzneho uhlia v manažmente životného prostredia* : bakalárska práca. Trnava : TRUNI, 2020. 55 s.

VAN SETERS, T. 2009. Evaluation of Green Roofs for Runoff Retention, Runoff Quality, and Leachability. In *Water Quality Research Journal*. ISSN 2709-8044, 2009, vol. 44, no. 1, p. 33-47.

VANWOERT, N. D. a kol. 2005a. Green Roof Stormwater Retention. In *Journal of Environment Quality*. ISSN 1537-2537, 2005, vol. 34, no. 3, p. 1036.

VANWOERT, N. D. a kol. 2005b. Watering Regime and Green Roof Substrate Design Affect Sedum Plant Growth. In *HortScience*. ISSN 0018-5345, 2005, vol. 40, no. 3, p. 659-664.

VAVRINCOVÁ, L. 2021. *Fyzikálno-chemické vlastnosti vybraných materiálov ako potenciálnych zložiek substrátov pre zelené strechy* : bakalárska práca. Trnava : TRUNI, 2021. 67 s.

VIJAYARAGHAVAN, K. – JOSHI, U. M. – BALASUBRAMANIAN, R. 2012. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. In *Water Research*. ISSN 0043-1354, 2012, vol. 46, p. 1337-1345.

VIJAYARAGHAVAN, K. – RAJA, F. D. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. In *Water Research*. ISSN 0043-1354, 2014, vol. 63, p. 94-101.

Vyhľadška Ministerstva pôdohospodárstva Slovenskej republiky 577/2005 Z.z. ktorou sa ustanovujú typy hnojív, zloženie, balenie a označovanie hnojív, analytické metódy skúšania hnojív, rizikové prvky, ich limitné hodnoty pre jednotlivé skupiny hnojív, prípustné odchýlky a limitné hodnoty pre hospodárske hnojivá

WANG, H. – QINB, J. – HU, Y. 2017. Are green roofs a source or sink of runoff pollutants? In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2017, vol. 107, p. 65-70.

WANG, J. – WANG, S. 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. In *Journal of Cleaner Production*. ISSN 0959-6526, 2019, vol. 227, p. 1002-1022.

WANG, X. – TIAN, Y. – ZHAO, X. 2017. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. In *Science of The Total Environment*. ISSN 0048-9697, 2017, vol. 592, p. 465-476.

WANI, I. a kol. 2021. Multiple Regression Model for Predicting Cracks in Soil Amended with Pig Manure Biochar and Wood Biochar. In *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. ISSN 2153-5493, 2021, vol. 25, no. 1, 04020007.

WEBER, K. – QUICKER, P. 2018. Properties of biochar. In *Fuel*. ISSN 0016-2361, 2018, vol. 217, p. 240-261.

WERDIN, J. a kol. 2021. Biochar particle size and amendment rate are more important for water retention and weight of green roof substrates than differences in feedstock type. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2021, vol. 171, 106391.

XIE, T. a kol. 2015. Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. ISSN 1064-3389, 2015, vol. 45, no. 9, p. 939-969.

YANG, H. a kol. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. In *Fuel*. ISSN 0016-2361, 2007, vol. 86, no. 12-13, p. 1781-1788.

- YE, J. a kol. 2013. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive green roofs. In *Ecological Engineering*. ISSN 0925-8574, 2013, vol. 55, p. 29-34.
- YIO, M. H. N. a kol. 2013. Experimental analysis of green roof substrate detention characteristics. In *Water Science and Technology*. ISSN 0273-1223, 2013, vol. 68, no. 7, p. 1477-1486.
- YOUNG, T. a kol. 2014. Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. In *Urban Forestry & Urban Greening*. ISSN 1618-8667, 2014, vol. 13, no. 3, p. 507-516.
- YURISTY, G. 2013. Considering a Green Roof Substrate for Northern Climates : diplomová práca. Ontario : The University of Guelph, 2013. 115 s.
- ZHANG, W. – ZHONG, X. – CHE, W. 2017. Nutrient leaching from extensive green roofs with different substrate compositions: a laboratory study. In *Water Science and Technology*. ISSN 0273-1223, 2017, vol. 77, no. 4, p. 1007-1014.
- ZHENG, X. 2021. Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. In *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 0921-3449, 2021, vol. 170, p. 105577.

Príloha 1

Jana Urbanová, Lenka Vavrincová, Martin Pipíška. Možnosti využitia biouhlia z čistiarenských kalov v extenzívnych strešných substrátoch. In *Zborník prác Celoslovenská študentská vedecká konferencia študentov 1., 2. a 3. stupňa vysokoškolského štúdia APLIKOVANÉ PRÍRODNÉ VEDY 2021*. Trnava : UCM Fakulta prírodných vied, 2021. ISBN 978-80-572-0165-6, p. 27-33.

UNIVERZITA SV. CYRILA A METODA V TRNAVE

FAKULTA PRÍRODNÝCH VIED

Zborník prác

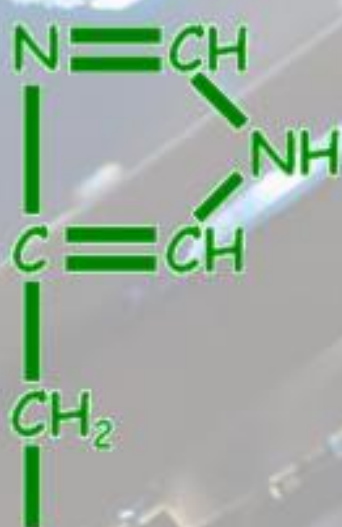
Celoslovenská študentská vedecká
konferencia

študentov 1., 2. a 3. stupňa vysokoškolského štúdia

APLIKOVANÉ PRÍRODNÉ VEDY 2021

Celoslovenská študentská vedecká
konferencia

@



12. máj 2021
Trnava

MOŽNOSTI VYUŽITIA BIOUHLIA Z ČISTIARENSKÝCH KALOV V EXTENZÍVNYCH STREŠNÝCH SUBSTRÁTOCH

JANA URBANOVÁ, LENKA VAVRINCOVÁ,
MARTIN PIPÍŠKA

*Katedra chémie, Pedagogická fakulta, Trnavská univerzita v Trnave,
Priemyselná 4, Trnava, 917 01
(jana.urbanova@tvu.sk)*

Abstrakt: Termochemická konverzia predstavuje zaujímavý spôsob spracovania čistiarenských kalov, pričom vznikajúci produkt – biouhlie, je možné využiť v rôznych agro- environmentálnych aplikáciách. Táto práca sa zaoberá možnosťami využitia biouhlia z čistiarenských kalov v substrátu pre extenzívne zelené strechy. Výsledky ukazujú, že prídavok biouhlia (10% v/v) signifikantne zvýšil hodnoty MVK a CEC extenzívneho strešného substrátu, pričom hodnoty pH, EC a objemovej hmotnosti sa výraznejšie nelíšili. V podmienkach experimentálnej zelenej strechy modifikovaný substrát vykazoval vyššiu schopnosť zadržiavať zrážky, čo sa prejavilo aj v zvýšenej vlhkosti substrátu počas sledovaného obdobia v porovnaní s extenzívnym strešným substrátom bez prídavku biouhlia. Na základe získaných výsledkov sa biouhlie z čistiarenských kalov javí ako vhodný komponent strešných substrátov s potenciálom znížiť intenzitu starostlivosti o extenzívne zelené strechy.

Kľúčové slová: extenzívny strešný substrát, biouhlie, zelené strechy

1. Úvod

Zelené strechy predstavujú vhodný nástroj na minimalizáciu celkového efektu urbanizácie. Zmierňujú vplyvy mestského tepelného ostrova a zlepšujú tepelný režim budov (DVORAK a VOLDER, 2010), účinne zadržujú zrážkové vody, čo najmä v prípade intenzívnych búrok znižuje nápor na dažďovú kanalizáciu (KUOPPAMÄKKI a kol., 2016). Popri konštrukčných aspektoch rozhodujúcu úlohu pri dosiahnutí spomínaných benefitov zohráva rastový substrát (CAO a kol., 2014), ktorý musí spĺňať viacero kritérií (chemická stabilita, nízka hmotnosť, vzdušnosť, optimálne hodnoty pH, schopnosť odvádzať vodu) a popritom zabezpečovať všetky dôležité požiadavky pre rast rastlín v extrémnych podmienkach. Avšak z dôvodu rozdielov v klimatických podmienkach i dostupných druhov rastlín neexistuje univerzálny strešný substrát pre zelené strechy (AMPIM a kol., 2010). Snaha implementovať princípy cirkulárnej ekonomiky sa prejavuje aj pri hľadaní možností modifikovať zloženie strešných substrátov pri súčasnom zachovaní ich kľúčových vlastností. V súčasnosti sú súčasťou strešných substrátov rôzne recyklované materiály (drvená tehla, škridla...) nahrádzajúce klasické anorganické zložky ako pemza, zeolity, scoria či vermikulit, ktoré sú miešané s hnojivami a organickou zložkou (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Hľadanie nových možností nakladania s čistiarenskými kalmi sa stáva jednou z najdôležitejších výziev v EÚ. Podľa Eurostatu (2018) len v roku 2016 skončilo na skládkach v SR viac ako 7000 ton kalov z komunálnych ČOV, čo predstavuje až 14 % ich ročnej produkcie. Ako zaujímavá možnosť spracovania kalov sa javí ich termochemická konverzia na biouhlie (RACEK a kol., 2019). Pyrolýzou čistiarenských kalov možno získať produkt vyznačujúci sa vysokým obsahom P a K a nižšou dostupnosťou toxických kovov (FRIŠTÁK a kol., 2018) vhodný pre rôzne agro-environmentálne aplikácie. Iba niekoľko prác (CHEN a kol., 2018) sa zaoberá využitím biouhlia na báze čistiarenských kalov, ako zložky substrátov pre zelené strechy, aj to v klimaticky odlišných podmienkach. Preto sa predkladaná práca zaoberá možnosťami využitia pyrolyzovaných čistiarenských kalov ako zložky extenzívnych strešných substrátov v podmienkach SR. Pozornosť sme venovali predovšetkým biouhliu, jeho fyzikálno-chemickým vlastnostiam a jeho vplyvu na vlastnosti strešných substrátov.

2. Materiál a metódy

Príprava biouhlia, strešných substrátov a experimentálnej zelenej strechy

Biouhlie na báze čistiarenských kalov používané v experimentoch sa pripravilo procesom rýchlej pyrolýzy v kontinuálnom pyrolýznom reaktore Pyreka 2.1 s dobou zdržania 10 min pri 600 - 650°C (Ithaka Inst., Švajčiarsko). Extenzívny strešný substrát bez a s 10% (v/v) prídavkom biouhlia sa pripravil v spolupráci s firmou JV INTERSAD, s. r. o., pričom základ pozostával z kompostu, minerálnej drte, keramzitu a riolitu. Pripravené substráty sa použili pri konštruovaní experimentálnych zelených striech (Obr. 1) nainštalovaných na streche budovy Pedagogickej fakulty TU v Trnave. Zostavu tvorili polypropylénové boxy (600 × 400 × 120 mm, 8ks) s drenážnou vrstvou Nophadrain ND100 pozostávajúcej z drenážnej rohože (7 mm), filtračnej geotextílie a tlakovo-roznášajúcej vrstvy s tlakovou únosnosťou 500 kN m⁻². Do každého boxu (0,24 m²) so 16 l extenzívneho strešného substrátu bez (4 ks) a s prídavkom biouhlia (4 ks) o výške 8 cm v sklone 4,5° sa vysadilo 9 rastlín rodu *Sedum*. Eluát sa zberal do plastových kanistrov umiestnených pod každým boxom (Obr. 1).



Obr. 1 Experimentálna zostava na streche PdF TU v Trnave.

Charakterizácia biouhlia a strešných substrátov

Celkový obsah C, H a N v biouhli sa stanovil použitím prvkového analyzátoru (CHNS-O EA 1108, Carlo Erba Instruments, Taliansko). Obsah kovov v biouhli a strešnom substráte sa analyzoval po mineralizácii použitím ICP-MS (Perkin Elmer, Elan DRCe 9000, USA), AAS a RFS. Analýza štruktúry a povrchov biouhlia sa realizovala rastrovacím elektrónovým mikroskopom JEOL JSM7600 F (Japonsko). pH, elektrická vodivosť (EC) a celkové množstvo rozpustených látok (TDS) sa merali vo vodnom výluhu (substrát, 1:5 w/v) a vo výluhu z 0,01 M CaCl₂ (biouhlie, 1:10 w/v) pH/EC/TDS multimetrom HI3220. Kationovo výmenná kapacita (CEC) biouhlia a strešného substrátu sa stanovila podľa ISO 11260 (Frišták a kol., 2013) s pomocou roztoku BaCl₂. Maximálna kapilárna vodná kapacita (MVK) a objemová hmotnosť substrátov sa stanovila podľa postupu Novák (1953) a na výpočet sa použili nasledovné vzťahy:

$$\rho = m/V \quad \text{a} \quad \Theta MVK = (mMVK - md/V) \cdot 100$$

kde: ρ – objemová hmotnosť; m – hmotnosť substrátu za príslušných podmienok; V – objem po stlačení; $mMVK$ – hmotnosť umelo vodou nasýtenej vzorky po 2 hod. nasávania; md – hmotnosť vzorky vysušenej do konštantnej hmotnosti; V – objem vzorky.

Monitorovanie poveternostných podmienok, pôdnej vlhkosti a analýza eluátu

Na monitorovanie dennej teploty, vlhkosti a úhrnu zrážok (30 min interval) sa použila meteostanica Garni 935PC s integrovaným bezdrôtovým senzorom 2INT vo výške 2 m nad povrchom v blízkosti experimentálnej zelenej strechy. Monitoring vlhkosti a teploty substrátu bez a s prídavkom biouhľia sa realizoval použitím senzorov pôdnej vlhkosti a teploty SMT100, dataloggeru TruLog 100 a softvéru TrueLog100-configuration software V2.5.0 (Truebner, Nemecko) v 30 min intervaloch. Zber eluátu do plastových kanistrov pod každým boxom sa zabezpečil navítaním otvorov do dna boxov. Vo vzorkách eluátu sa stanovili pH, EC a TDS použitím pH metra WTW Multi 3420 a pH/EC/TDS multimetra HI3220.

3. Výsledky a diskusia

Fyzikálne a chemické vlastnosti biouhľia a strešných substrátov

Základné fyzikálno-chemické vlastnosti biouhľia pripraveného procesom rýchlej pyrolýzy čistiarenských kalov pri 600 - 650°C sú uvedené v Tab. 1. Podobne ako väčšina pyrolýznych produktov na báze čistiarenských kalov sa aj nami používané biouhlie vyznačuje relatívne nízkym obsahom organického uhlíka (21,1%) a podľa klasifikácie IBI (International Biochar Initiative) patrí do kategórie B (obsah $C_{org} \leq 30\%$). Obsah H, N a S bol 0,5; 1,5 a 2,31 %. Biouhlie má mierne alkalický charakter (pH 7,8 – 8,1), vyššiu hodnotu špecifického povrchu (151 m².g⁻¹) a objem pórov (0,112 cm³.g⁻¹). Práve porozita a špecifický povrch významne ovplyvňujú vodozadržnú kapacitu biouhľia a naznačujú jeho potenciálne využitie ako zložky strešných substrátov.

Tab. 1 Základné fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti biouhľia z čistiarenských kalov.

CEC (meq 100 g ⁻¹)	C (%)	EC (dS m ⁻¹)	pH	S _{BET} (m ² g ⁻¹)	V _{pore} (cm ³ g ⁻¹)	V _{micro} (cm ³ g ⁻¹)	V _{meso} (cm ³ g ⁻¹)
4,22	21,1	0,464	7,8 - 8,1	151	0,112	0,061	0,045

Avšak, limitujúcim faktorom pri aplikácii čistiarenských kalov, ale aj pyrolýznych produktov na báze čistiarenských kalov, do poľnohospodárskej a lesnej pôdy alebo ako zložky záhradníckych substrátov je obsah ťažkých kovov, ktorý závisí od kvality odpadových vôd (Racek a kol., 2020). V Tab. 2 je uvedená koncentrácia kovových a nekovových prvkov v biouhľí, strešnom substráte bez a s prídavkom 10% biouhľia a limitné hodnoty kovov podľa vyhlášky Ministerstva pôdohospodárstva SR č. 577/2005 z.z. Je zrejmé, že vysoký obsah Zn, Cu a Cr v biouhľí znemožňuje jeho využitie vo forme pôdneho aditíva. Avšak, pri prídavku 10% (v/v) biouhľia strešný substrát spĺňa limitné hodnoty určené vyhláškou, čo umožňuje jeho bezpečné použitie. Navyše, viacero štúdií potvrdzuje, že pri pyrolýze čistiarenských kalov dochádza k transformácii mobilných foriem kovov (Cu, Zn, Pb, Mn, Cr a Ni) na relatívne stabilné formy, čím sa významne znižuje ich biologická dostupnosť pre rastliny, priame ekotoxikologické riziko (FRIŠTÁK a kol., 2018; LU a kol., 2015) aj možnosť prípadnej kontaminácie dažďovej vody otekajúcej zo zelenej strechy. Použité biouhlie je tiež vhodným zdrojom živín (K, P), čo sa prejaví poklesom nárokov na údržbu zelenej strechy.

Fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti extenzívneho strešného substrátu bez a s prídavkom 10% biouhľia sú uvedené v Tab. 3. Je zrejmé, že prídavok biouhľia výrazne neovplyvnil objemovú hmotnosť, pH ani EC substrátu. Naopak, prídavok biouhľia spôsobil zvýšenie hodnoty CEC o 41% a MVK o 15%. Pri porovnaní s pôdami, kde sa CEC pohybuje v rozmedzí 1 – 30 meq 100 g⁻¹ (SONON a kol., 2017), nami zistené hodnoty CEC substrátov poukazujú na možnosť pestovania vybraných druhov rastlín. Oba substráty spĺňajú požiadavky normy FLL (Landscape Development and Landscaping Research Society e.V.)

s výnimkou MVK, čo je spôsobené použitím odlišného postupu stanovenia určeného pre pôdy.

Tab. 2 Obsah kovových a nekovových prvkov v biouhľí pripravenom z čistiarenských kalov a limitné hodnoty podľa vyhlášky č. 577/2005 zz.

Prvok	Biouhlie ¹	Substrát ³	Substrát + 10% biouhlie ³	Limitná hodnota
Zn (mg/kg)	1300	200	310	400
Pb (mg/kg)	22	17,8	18,2	100
Hg (mg/kg)	< 0,02	0,15	0,14	1
Cu (mg/kg)	560	50,5	101,5	200
Cr (mg/kg)	130	26,6	36,9	100
Ni (mg/kg)	< 0,4 ²	18,6	16,7	50
Cd (mg/kg)	< 0,1	< 0,4	< 0,4	10
As (mg/kg)	5,4	6,1	6,03	10
Co (mg/kg)	8,1	-	-	-
Fe (g/kg)	98	-	-	-
Se (g/kg)	< 0,4 ²	0,26	0,23	-
K (g/kg)	4,6	-	-	-
P (g/kg)	56	-	-	-

1 – stanovené použitím ICP-MS po mokrom rozklade; 2 – stanovené použitím RFS; 3 – stanovené použitím AAS-HG, AAS-AMA, AAS-F

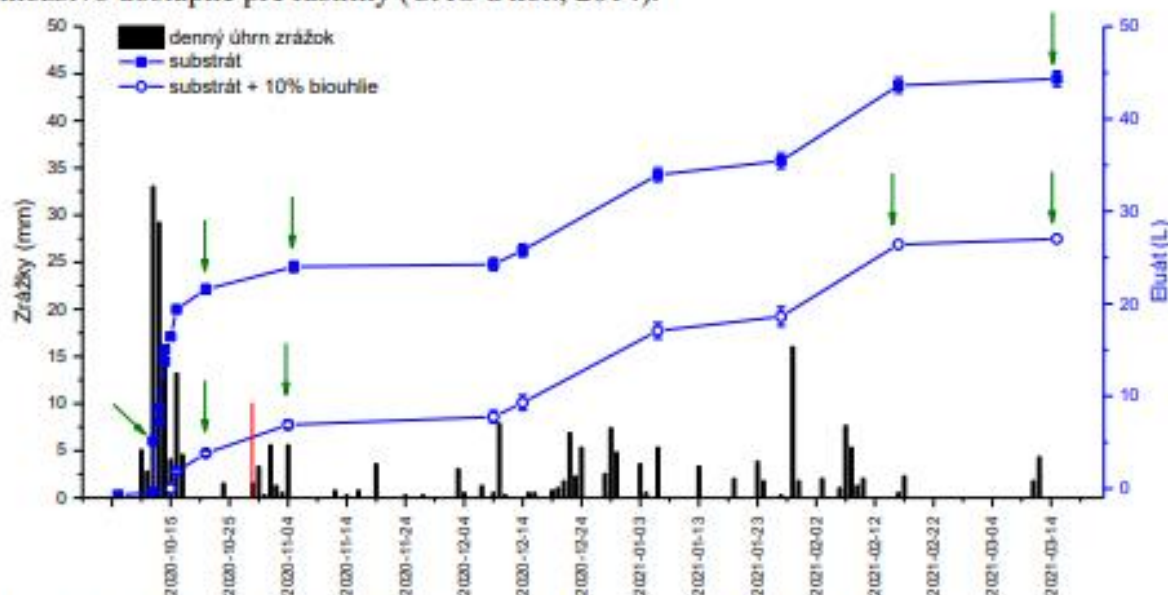
Tab. 3 Fyzikálne a fyzikálno-chemické vlastnosti strešných substrátov a limitné hodnoty podľa FLL normy (FLL, 2018).

	CEC [meq 100 g ⁻¹]	EC [dS m ⁻¹]	MVK [%]	ρ_d^* [g cm ⁻³]	ρ_w^{**} [g cm ⁻³]	pH	TDS [ppm]
Substrát	4,91	1,31	16,76	0,76	1,46	7,56	652
Substrát + 10% biouhlie	7,05	1,13	19,23	0,75	1,47	7,69	566
FLL	-	≤ 6	20 - 65	-	-	6,0 - 8,5	≤ 3500

Experimentálna zelená strecha

Vhodnosť využitia biouhľia z čistiarenských kalov v substráte sme overili aj v podmienkach experimentálnej zelenej strechy. Boxy so substrátom bez a s prídavkom biouhľia s vysadenými rastlinami rodu *Sedum* boli umiestnené na strechu 7.10. a 14.10.2020. V sledovanom období (7.10.2020 - 15.3.2021) sme zaznamenali 52 dní s dažďovými a snehovými zrážkami (Obr. 2), pričom celkovo napršalo 251,7 mm. Z dôvodu postupného umiestňovania boxov na strechu v období s intenzívnymi zrážkami sa celkové množstvo prijatých zrážok substrátmi líši. Kým do boxov s extenzívnym strešným substrátom napršalo 251,7 mm, v boxoch so substrátom s 10% prídavkom biouhľia to bolo iba 182,7 mm. Napriek rozdielom v množstve prijatých zrážok je zrejme, že prídavok biouhľia do substrátu zvyšuje jeho schopnosť zadržiavať zrážky aj v jesennom a zimnom období bohatom na zrážky (Tab. 4). Podobne aj KUOPPAMÄKI a kol. (2016) pozorovali vyššiu schopnosť zadržiavať zrážky v prípade substrátov s prídavkom biouhľia, pričom dôležitú úlohu tiež zohrávala prítomná vegetácia. Na Obr. 3 je uvedená vlhkosť substrátov zaznamenaná senzormi SMT100. Je evidentné, že aj napriek rozdielom v množstve prijatých zrážok (Tab. 4), je vlhkosť substrátu s prídavkom biouhľia vyššia počas celého sledovaného obdobia. Táto

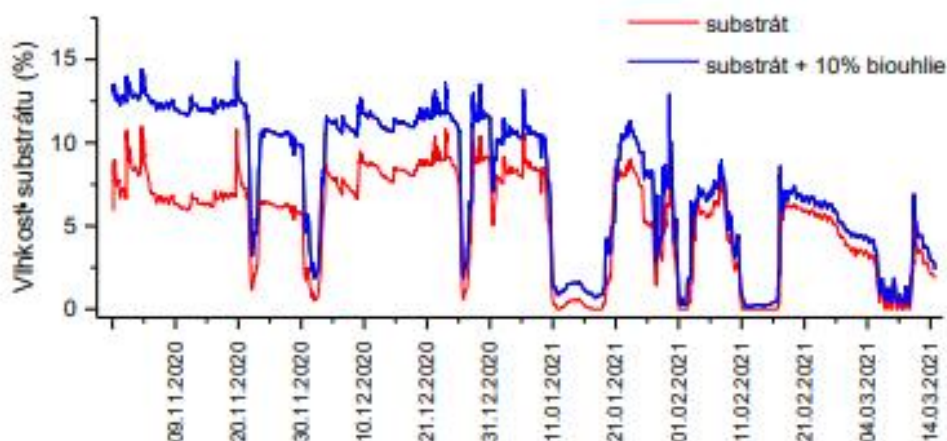
skutočnosť súvisí so schopnosťou biouhľia absorbovať a zadržiavať vodu, čím sa zvyšuje jej množstvo dostupné pre rastliny (CAO a kol., 2014).



Obr. 2 Zrážky (mm) a priemerný kumulatívny objem eluátu zo substrátov experimentálnych zelených striech bez a s 10% prídavkom biouhľia od 7.10.2020 do 15.3.2021. Zelené šípky – odber vzoriek eluátu; červená čiara – umelo pridaných 10 mm dažďovej vody.

Tab. 4 Celkové množstvo zrážok (mm a L), eluátu (L) a vodozadržná kapacita (%) substrátu bez a s prídavkom biouhľia.

Strešný substrát	Celkové zrážky (mm)	Celkové zrážky (L)	Eluát (L)	Zadržná kapacita (%)
Substrát + 0% biouhlie	251,7	53,08	44,45	16,3
Substrát + 10% biouhlie	182,7	38,55	27,01	29,9



Obr. 3 Priemerná vlhkosť substrátov experimentálnej zelenej strechy bez (---) a s 10% prídavkom biouhľia od 30.10.2020 do 15.3.2021. Sensory pôdnej vlhkosti zaznamenávajú vlhkosť iba pri teplotách vyšších ako 0°C.

Z merania vodivosti eluátov strešných substrátov v období od 12.10.2020 do 15.3.2021 sme najvyššie hodnoty zaznamenali po založení experimentu (6 - 9 mS.cm⁻¹). Vodivosť postupne klesala k 1 mS.cm⁻¹, čo zodpovedá TDS 500 ppm (0,5 mg.L⁻¹). pH eluátov sa v období od

12.10.2020 do 6.11.2020 pohybovalo v rozmedzí 7,3 - 8,1, pričom vyššie pH bolo zaznamenané v eluátoch zo substrátov bez prídavku biouhlia. Zvýšenie pH sme pozorovali 2.2 a 15.3.2021 s priemernou hodnotou 8,4 - 9,7. Uvedené zmeny zrejme súvisia so silnými mrazmi v priebehu januára a februára a topením premrznutého substrátu, kedy dochádza k fyzikálnemu poškodeniu zložiek substrátu, lýze mikroorganizmov, čo sa môže prejaviť okrem iného aj zvýšením pH eluátu. Objasnenie tohto procesu si bude vyžadovať detailnejšie štúdium.

4. Záver

Extenzívny strešný substrát pripravený v spolupráci s firmou JV INTERSAD, s. r. o. sme upravili prídavkom 10% (v/v) biouhlia z čistiarenských kalov. Takto modifikovaný substrát spĺňal limitné hodnoty obsahu rizikových prvkov určené vyhláškou, čo umožňuje jeho bezpečné použitie. Prídavok biouhlia signifikantne zvýšil hodnoty MVK a CEC extenzívneho strešného substrátu, pričom hodnoty pH, EC a objemovej hmotnosti sa výraznejšie nelíšili. V podmienkach experimentálnej zelenej strechy modifikovaný substrát vykazoval vyššiu schopnosť zadržiavať zrážky, čo sa prejavilo aj v zvýšenej vlhkosti substrátu počas sledovaného obdobia v porovnaní s extenzívnym strešným substrátom bez prídavku biouhlia. Na základe získaných výsledkov sa biouhlie z čistiarenských kalov javí ako vhodný komponent strešných substrátov, s potenciálom znížiť intenzitu starostlivosti o extenzívne zelené strechy. Dôležité však bude preskúmať aj ďalšie oblasti vplyvu biouhlia na vlastnosti strešných substrátov, ako napríklad zastúpenie prospešných mikroorganizmov, prosperovanie vegetácie spojené s dostupnosťou živín v substrátoch či uvoľňovanie ťažkých kovov do odtoku.

Literatúra

- CAO, C.T.N., FARRELL, C., KRISTIANSEN, P.E., RAYNER, J.P. (2014) Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. In: *Ecol. Eng.*, 2014, 71, s. 368-374.
- CHEN, H. MA, H., WANG, X., XU, P., ZHENG, S., ZHAO, Y. (2018) Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs. In: *Forests*, 2018, 9, s. 413.
- DVORAK, B., VOLDER, A. (2010) Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. In: *Lands. Urban Plan.*, 2010, 96, s. 197-213.
- FLL (2018) *Green Roof Guidelines – Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs*. Bonn: Landscape Development and Landscaping Research Society e.V., 2018. 150 s.
- FRIŠTÁK, V., PÍPIŠKA, M., HORNÍK, M., AUGUSTÍN, J., LESNÝ, J. (2013) Sludge of wastewater treatment plants as Co^{2+} ions sorbent. In: *Chem. Papers*, 2013, 67, s. 265-273.
- FRIŠTÁK, V., PÍPIŠKA, M., GERHARD, S. (2018) Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. In: *J. Clean. Prod.*, 2018, 172, s.1772-1778.
- KUOPPAMÄKI, K., HAGNER, M., LEHVÄVIRTA, S., SETÄLÄ, H. (2016) Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. In: *Ecol. Eng.*, 2016, 88, s. 1-9.
- LU, T., YUAN, H., WANG, Y., HUANG, H., CHEN, Y. (2015) Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. In: *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 2015, 18, s. 725-733.
- NOVÁK, V. (1953) *Půdoznalství I–III*. Praha: SPN, 1953. 341 s.
- RACEK, J., SEVCIK, J., CHORAZY, T., KUCERIK, J., & HLAVINEK, P. (2020) Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. In: *Waste Biomass Valori.*, 2020, 11, s. 3677-3709.

- SONON, L. S., KISSEL, D. E., SAHA, U. (2017) Cation Exchange Capacity and Base Saturation. University of Georgia Extension Circular 1040, 4 s.
- VIJAYARAGHAVAN, K. (2016) Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 57, s. 740-752.
- Vyhláška č. 577/2005 Z. z.: 2005: Vyhláška Ministerstva pôdohospodárstva Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú typy hnojív, zloženie, balenie a označovanie hnojív, analytické metódy skúšania hnojív, rizikové prvky, ich limitné hodnoty pre jednotlivé skupiny hnojív, prípustné odchýlky a limitné hodnoty pre hospodárske hnojivá.