

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA GEOENVIRONMENTÁLNÍCH VĚD



OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI APLIKOVANÉHO
BIOCHARU V SUBSTRÁTU ZELENÝCH STŘECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Mgr. Lukáš Trakal, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Jan Punčochář

Bakalant: Alesiiia Soifer

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Alesia Soifer

Aplikovaná ekologie

Název práce

Ověření funkčnosti aplikovaného biocharu v substrátu zelených střech

Název anglicky

Verification of the functionality of applied biochar in green roof substrate

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je ověření funkčnosti biocharu u substrátu určeného pro extenzivní zelené střechy. Předpokladem je vyšší zádrž vody (resp. vyšší objemová vlhkost) u ošetřeného substrátu.

Metodika

Pro ověření funkčnosti biocharu v substrátu zelených střech je třeba:

1. provést rešerši odborné literatury, která se týká vegetačních střech a biocharu s akcentem na střechy extenzivní
2. připravit experimentální střechy na kontrolu funkčnosti substrátu (rozdělení testované střechy na celkem 6 segmentů),
3. testovat funkčnost substrátu s/bez biocharu měřením objemové vlhkosti v čase (doprovázeno atmosférickým měřením),
5. analyzovat a porovnávat výsledky ze všech vybraných experimentálních ploch (6 střech),
6. diskutovat prezentované výsledky a jejich srovnání s výsledky publikovaných studií.

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

Zelená střecha, vegetační střecha, vegetace, substrát, biochar, retence srážkových vod

Doporučené zdroje informací

- Čermáková, B. (2009). Ozeleněné střechy. Grada Publishing as.
- Harada, Y., Whitlow, T. H., Bassuk, N. L., & Russell-Anelli, J. (2020). Rooftop Farm Soils for Sustainable Water and Nitrogen Management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 123.
- Huang, S., Garg, A., Mei, G., Huang, D., Chandra, R. B., & Sadasiv, S. G. (2020). Experimental study on the hydrological performance of green roofs in the application of novel biochar. *Hydrological Processes*, 34(23), 4512-4525.
- Tan, K., & Wang, J. (2023). Substrate modified with biochar improves the hydrothermal properties of green roofs. *Environmental Research*, 216, 114405.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Mgr. Lukáš Trakal, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra geoenvironmentálních věd

Konzultant

Ing. Jan Punčochář

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2023

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Ověření funkčnosti aplikovaného biocharu v substrátu zelených střech“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila, ty jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že se na moji bakalářskou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne: 15.03.2023

.....

Alesia Soifer

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu práce doc. Mgr. Lukášovi Trakalovi, Ph.D. za Vaši neocenitelnou pomoc při psaní mé bakalářské práce. Vaše odborné rady, návrhy a konzultace mi byly velkou oporou a pomohly mi lépe porozumět problematice. Dále bych ráda poděkovala svému konzultantovi práce Ing. Janu Punčochářovi za poskytnutí dat. Také bych chtěla poděkovat své rodině a přáteli za podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Zelené střechy jsou nejen nedílnou součástí moderní architektury, ale také technologií s velkým ekologickým a ekonomickým potenciálem. Jednou z jejich funkcí je retence dešťové vody pro snížení zatížení kanalizace. Biochar je vynikajícím doplňkem k substrátu zelených střech díky své pórovitosti, vysokému obsahu uhlíku, nízké objemové hmotnosti a retenční schopnosti. Aplikace biocharu do substrátu zelených střech je řešením problémů souvisejících s hospodařením městských srážkových vod. Tato technologie zvýší kvalitu odtoku dešťové vody a zmenší jeho objem.

Cílem této práce je ověřit hypotézu, zda aplikace biocharu do substrátu zelené střechy pozitivně ovlivňuje retenční schopnost tohoto substrátu. Pro ověření této hypotézy byl proveden experiment na extenzivní zelené střeše v Praze. Zelená střecha byla rozdělena do šesti polí. Tři pole byla kontrolní se standardním komerčním substrátem pro extenzivní zeleň. Zbývající tři pole byla upravena přidáním 5 % biocharu. Na střeše byly instalovány senzory pro měření teploty a půdní vlhkosti a meteorologická stanice pro záznam množství a doby srážek. Na základě dat získaných měření jsme srovnali retenční schopnosti běžně dostupného substrátu a varianty substrátu obohaceného biocharem. Získané výsledky byly vyhodnoceny a porovnány s výsledky jiných podobných studií. Práce zpracovává data z dlouhodobého monitoringu množství vody v zelené střeše. Měření probíhalo od května 2021 do konce roku 2022.

Výsledky experimentu potvrdily hypotézu, že aplikace biocharu do substrátu extenzivní zelené střechy má pozitivní vliv na zvýšení retenční schopnosti substrátu. Pole s aplikovaným biocharem měla vyšší retenční schopnost než kontrolní pole neupravená biocharem. Největší vliv biocharu byl zaznamenán při méně častých a intenzivnějších srážkách. Výsledná data ukázala, že v prvním roce experimentu byl substrát s biocharem stabilnější ve vztahu k retenci dešťové vody než ve druhém roce. Tyto výsledky jsou potvrzením pozitivního vlivu biocharu v substrátu zelených střech jako nástroje pro hospodaření s dešťovou vodou. Závěry dále rozšiřují znalosti o přínosech biocharu jako půdního aditiva.

Klíčová slova: zelená střecha, vegetační střecha, vegetace, substrát, biochar, retence srážkových vod, úprava biocharem, střešní substrát

Abstract

Green roofs are not only an integral part of modern architecture but also a technology with great ecological and economic potential. One of their functions is the retention of rainwater to reduce the load on sewers. Biochar is an excellent complement to the green roof substrate due to its porosity, high carbon content, low bulk density, and retention capacity. The application of biochar to green roof substrates is a solution to the problems associated with urban stormwater management. This technology will improve the quality of stormwater runoff and reduce its volume.

The aim of this study is to test the hypothesis of whether the application of biochar to green roof substrate positively affects the retention capacity of the substrate. To test the hypothesis, an experiment was conducted on an extensive green roof in Prague. The green roof was divided into six fields. Three fields were controlled with the standard commercial substrate for an extensive green roof. The remaining three fields were treated by adding 5 % biochar. Sensors were installed on the roof to measure temperature and water quantity in the fields and a weather station to record the amount and timing of rainfall. Based on the data obtained from the measurements, we compared the retention capacity of the commonly available substrate and the biochar-enriched variant. The results obtained were evaluated and compared with the results of other similar studies. The paper elaborates on data from long-term monitoring of water quantity in a green roof. The measurements were carried out from May 2021 to the end of 2022.

The results of the experiment confirmed the hypothesis that the application of biochar to the substrate of an extensive green roof has a positive effect on increasing the water retention capacity of the substrate. Fields with biochar applied had higher retention capacity than control fields not treated with biochar. The greatest effect of biochar was observed when rainfall was less frequent and more intense. The resulting data showed that in the first year of the experiment, the substrate with biochar was more stable in relation to rainwater retention than in the second year. These results confirm the positive effect of biochar in the green roof substrate as a stormwater management tool. The findings further expand the knowledge on the benefits of biochar as a soil additive.

Keywords: green roof, vegetated roof, vegetation, substrate, biochar, rainwater retention, biochar treatment, roof substrate

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce	3
3. Literární rešerše	4
3.1 Zelené střechy	4
3.1.1 Historie	4
3.1.2 Dělení střech podle typu sklonu	6
3.1.3 Dělení zelených střech podle typu vegetace.....	7
3.1.3.1 Biotopní zelená střecha.....	7
3.1.3.2 Extenzivní zelená střecha	8
3.1.3.3 Intenzivní jednoduchá střecha	9
3.1.3.4 Intenzivní zelená střecha	9
3.1.4 Skladba střešních pláštíů zelených střech	10
3.1.5 Význam a funkce zelených střech	13
3.1.5.1 Enviromentální funkce	13
3.1.5.2 Ekonomická funkce	15
3.1.5.3 Estetická funkce.....	15
3.2 Biochar.....	15
3.2.1 Historie biocharu	16
3.2.2 Výroba biocharu	17
3.2.2.1 Pomalá pyrolýza	17
3.2.2.2 Rychlá pyrolýza.....	18
3.2.2.3 Torrefikace	18
3.2.2.4 Zplyňování.....	19
3.2.3 Vlastnosti biocharu.....	19
3.2.3.1 Chemické vlastnosti biocharu.....	19
3.2.3.2 Fyzikální vlastnosti biocharu.....	21

3.2.4	Aplikace biocharu na zelených střechách	24
4.	Metodika.....	29
4.1	Substrát pro extenzivní střechy.....	29
4.2	Biochar.....	29
4.3	Experiment na extenzivní zelené střeše	31
4.3.1	Skladba experimentální střechy.....	31
4.3.2	Vegetace experimentální zelené střechy	33
4.4	Experimentální měření.....	34
4.4.1	Měření půdní vlhkosti	34
4.4.2	Meření atmosférických parametrů.....	37
4.4.3	Zpracování naměřených dat	37
5.	Výsledky	39
6.	Diskuze	44
7.	Závěr	49
8.	Seznam použité literatury	50
9.	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	57

1. Úvod

Stavba velkých měst je nekonečným procesem, města se permanentně budují a rozšiřují. Spolu s nimi roste nepropustný městský povrch. Zmíněná činnost vede k negativním důsledkům, jako jsou snížení přírodních prvků v krajině, fenomén tepelného ostrova, zhoršení kvality ovzduší kvůli antropogennímu znečištění, zvýšení povrchového odtoku a nadměrného zatížení kanalizace. Technologie ozelenění střech je jedním z potenciálních řešení těchto problémů. Dunnnett et al. 2004 uvádí, že v oblasti Mid-Manhattan West v New Yorku procento zastavěné nepropustné plochy přesahuje 90 %. Přitom střechy tvoří 40–50 % nepropustné plochy. To znamená, že zelené střechy mohou výrazně snížit procento nepropustného povrchu. Navíc mohou být použity k čištění vzduchu, retenci srážek a jako plocha vhodná pro městské zemědělství.

Aplikace biocharu je v současné době považována za potenciální nástroj pro řešení dalších problémů souvisejících s městskou ekologií a zemědělstvím. Wang et al. 2020 definuje biochar jako termochemický produkt přeměny biomasy. Jeho kvalita a množství se výrazně liší v závislosti na technologii výroby a primární biomase, což také ovlivňuje jeho výkonnost v zemědělských a lesnických systémech. Mnoho předchozích provedených studií naznačuje jeho velký potenciál ve zlepšování kvality půdy (Ding et al. 2016) a vody (Blanco-Canqui 2019), čištění odpadních vod (Klasson et al. 2013; Hameed et El-Khaiary 2008), zmírnění změny klimatu (Kuzyakov et al. 2009) a retence dešťové vody (Harada et al. 2020; Razzaghi et al. 2020; Huang et al. 2020; Tan et Wang 2023).

Použití biocharu v substrátu zelené střechy pro retenci dešťové vody je aktuální problematika. Pozitivní výsledky umožní částečně řešit problémy související se spotřebou vody na zalévání zelených střech a nadměrným zatížením kanalizačních systémů při intenzivních a dlouhodobých srážkách.

Harada et al. 2020 ve svém experimentu ukazuje, že použití biocharu v substrátu zelených střech zvyšuje retenční schopnost tohoto substrátu. Ve výzkumu byly použité dvě komerční směsi jako substráty: GreenTree Mix s biocharem (GB) a Rooflite (RL), což je komerční směs vyvinutá speciálně pro střešní zemědělství a používaná v Brooklyn Grange. Výsledky ukázaly, že substrát s přídavkem biocharu měl větší retenční schopnost než komerční substrát pro střešní zemědělství. Podobné výsledky

o pozitivním vlivu biocharu na retenční schopnost přinesly i mnohé studie (Kuoppamäki et al. 2016; Huang et al. 2020; Chen et al. 2018; Chen et al. 2021 a Tan et Wang 2023).

Ve výzkumech však zůstávají některé neznámé související s korelací mezi retenční schopností substrátu po úpravě biocharem a klimatickými a povětrnostními podmínkami zelené střechy, dále pak se zvoleným substrátem, vybraným typem ozelenění nebo množstvím použitého biocharu.

Pro získání další sady dat ověřujících a kvantifikujících možné přínosy aplikace biocharu byl proveden experiment na zelené střeše. Tato data jsou vyhodnocena a porovnána s předchozími studiemi.

2. Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je ověření hypotézy, že aplikace biocharu do substrátu extenzivní zelené střechy bude mít pozitivní vliv na retenční schopnost tohoto substrátu. K dosažení tohoto cíle byl proveden experiment na reálné extenzivní zelené střeše, která byla rozdělena do šesti polí. Polovina těchto polí měla komerční substrát pro extenzivní zeleň. Zbývající pole měla stejný komerční substrát upravený přidáním biocharu. Sledovaným obdobím jsou roky 2021 a 2022. Pro ověření hypotézy byla sbírána a vyhodnocena především data o množství vlhkosti v substrátu, teplotě substrátu a meteorologických podmínkách. Výsledky byly analyzovány a porovnány se závěry dalších podobných studií.

V první (teoretické) části práce je mým úkolem provést rešerši odborné literatury, která se týká zelených střech a biocharu. Výsledkem je základní popis zelených střech, jejich dělení, skladba a další. Dále bude popsán biochar – především postup výroby, vlastnosti a použití v substrátu zelených střech.

Druhá část práce se věnuje samotnému experimentu a je dělena na několik kapitol. První se věnuje materiálům a metodice experimentu se zaměřením na zvolené druhy substrátu a biocharu. Druhá popisuje podrobnosti experimentu (skladbu střechy, vegetaci), použité zařízení a metodu měření množství vlhkosti v půdě. Poslední kapitola uvádí výsledky experimentu, vyhodnocení a porovnání s výstupy jiných studií. Závěrem je souhrn výsledků a možný směr dalších experimentů.

3. Literární rešerše

3.1 Zelené střechy

Zelená střecha je střecha pokrytá vegetací. Zelené střechy jsou složeny z několika vrstev instalovaných na klasickou střechu. Pořadí a typy vrstev jsou zvoleny podle kritérií spojených s teritoriálním umístěním střechy, lokálními klimatickými podmínkami, konstrukcí původní střechy nebo dalším využitím zelené střechy. Základními vrstvami zelené střechy jsou vegetační, filtračně-separační, hydroakumulační, drenážní a izolační vrstvy.

3.1.1 Historie

Historicky nejznámější zelenou střechou jsou Visuté zahrady Semiramidiny (Visuté zahrady babylonské) – jeden ze sedmi divů světa. Byly vytvořeny z nepromokavé vrstvy pryskyřice s rákosím, vrstvy úrodné půdy a stromů, trav a keřů vysazených v zemi. Jejich výstavba se datuje kolem 600. roku před naším letopočtem (Osmundson 1999).

Obr. 1: Visuté zahrady Semiramidiny (Visuté zahrady babylonské) (Worldhistory ©2009)



Vegetační střechy měly velký úspěch v severských zemích. Zde se budují díky jejich praktičnosti. Ve Skandinávii jsou považovány za tradici. Na Islandu byly téměř jedinou ochranou před chladem (Simpson 1999). Tepelná izolace byla jednou z primárních funkcí zelených střech v minulosti. Hmotnost zelené střechy mohla překročit 100 kg/m² kvůli velkému počtu vrstev. Lidé střechu pokrývali hustými

vrstvami kůry a navrch používali travní drn. Drn byl položen na kůru zelení dolů a kořeny směrem nahoru. Takových vrstev bylo několik. Poslední vrstva byla obrácena kořeny dolů. Kořeny horní vrstvy prorostly skrz vrstvy spodní a konstrukci spojily (Čermáková 2009).

Obr. 2: Tradiční zelené střechy na Islandu (Wikipedia ©2005)



Po druhé světové válce se stavebnictví rychle rozvíjelo a objevily se nové druhy materiálů. Výstavba zelených střech se díky tomuto pokroku stala reálnější.

Neméně podstatné místo ve vývoji moderních zelených střech hraje Německo 60. až 80. let. Tehdy došlo k rozmachu vegetačních střech a byly spuštěny nové technologie související s propracovanými zavlažovacími systémy.

Oberndorfer et al. 2007 ve svém článku zmiňuje složení moderních zelených střech. Nedílnou součástí zelené střechy je několik vzájemně propojených vrstev, které společně poskytují různé funkce, jako je hydroizolace, drenáž, pěstební médium a vegetace. Vodotěsná membrána je vrstva z gumy nebo polyvinylchloridu, která brání úniku vody do budovy. Drenážní vrstva ze šterku nebo lehkého plastu je umístěna nad vodotěsnou membránou. Na drenážní vrstvu je umístěna vrstva filtrační tkaniny. Dále je zde pěstební médium, které se skládá z lehké půdy. Nejsvrchnější vrstvou je správně zvolená vegetace.

Obr. 3: Moderní extenzivní zelená střecha v Berlíně-Kreuzbergu (Köhler et Poll 2010)



3.1.2 Dělení střech podle typu sklonu

Střechy domu lze dělit dle mnoha kritérií. Z hlediska zelených střech jsou nejdůležitějšími parametry sklon střechy a volba druhu vegetace. Volba parametrů střechy závisí na mnoha faktorech, například na velikosti budovy a jejím účelu, klimatu regionu a estetických preferencích.

Střechy se dělí podle sklonu:

Tab. 1: Dělení střech podle sklonu (Čermáková 2009)

Typy střechy	Sklon [°]	Sklon [%]
Plochá	do 5	do 8,75
Šikmá s mírným sklonem	5–20	8,75–36,40
Šikmá s velkým sklonem	20–45	36,40–100
Strmá	45–90	nad 100

Střechy se dají ozelenit v rozmezí sklonů 0–60°. Pro různé úrovně sklonu se volí různá vegetace. Také je třeba si uvědomit, že pokud bude sklon příliš malý (menší než 2%), může nastat problém s odtokem vody. Pro tyto zelené střechy je lepší zvolit rostliny, které budou přizpůsobeny velkému množství vlhkosti. Při sklonu nad 5% roste potřeba akumulace vody. V důsledku toho je sklon od 2 do 5% považován za optimální pro ozelenění (Čermáková 2009).

3.1.3 Dělení zelených střech podle typu vegetace

Podle Čermáková 2009 lze zelené střechy dle typu vegetace dělit na čtyři hlavní druhy: biotopní, extenzivní, intenzivní jednoduchou a intenzivní. Různé druhy zelených střech mají různou tloušťku substrátu. Zaleží na ní volba vegetace. S hloubkou substrátu převážně stoupá i míra vyžadované péče.

3.1.3.1 Biotopní zelená střecha

Biotopní zelená střecha je nejstarší technologie ozelenění, která byla vyvinuta po celém světě. Jejím základem je ponechání střešní plochy přirozenému náletu rostlin. Díky tomu, že se vegetace objevuje samovolně, je tato metoda ozelenění nejjednodušší variantou pro údržbu. Biotopní zelená střecha je v symbióze se zbytkem vegetace kolem sebe a je jejím pokračováním. Biotopní zeleň se skládá zejména z rostlin, které jsou přizpůsobeny místním podmínkám, dobře regenerují, množí se a jsou schopné snášet extrémní podmínky. Sukulenty, traviny, byliny a mechy často slouží jako základ pro tento druh ozelenění.

Biotopní zeleň se ponechává bez péče a postupem času se její složení přirozeně mění. Důsledkem jsou velké finanční a časové úspory. Optimální tloušťka substrátu pro biotopní ozelenění je 6–12 cm. Takové střechy jsou zpravidla nepochozí. Není potřeba je zavlažovat ani hnojit a jde zejména o střechy ploché nebo šikmé (Čermáková 2009).

Obr. 4: Biotopní zelená střecha, Chiba University, 10. července 2015 (Nagase et al. 2018)



3.1.3.2 *Extenzivní zelená střecha*

Každým rokem extenzivní zelené střechy získávají stále větší popularitu. To je způsobeno tím, že je to jedna z nejnvýhodnějších variací ozelenění střechy, protože nevyžaduje velkou péči a má estetickou funkci. Pro extenzivní ozelenění jsou vhodné rostliny dobře přizpůsobené klimatickým podmínkám stanoviště. Důležitou vlastností je vysoká odolnost vůči extrémně suchému počasí a rychlá regenerace po dešti. Důležitost těchto vlastností vyplývá z malé výšky substrátu, tedy i z nízké úrovně zadržování vody v souvrství střechy. Je také důležité, aby rostliny odolávaly větru, k tomu potřebují zakořenit. Výsadbu vegetace je lepší provádět na jaře, první měsíce vegetace potřebuje závlahu pro zakořeňování (Čermáková 2009).

Těmto podmínkám nejlépe vyhovují suchomilné rostliny, travníky, byliny či tlusticovité rostliny.

Výběr vegetace závisí na mocnosti substrátu. Extenzivní zeleň lze dělit podle mocnosti substrátu do tří kategorií:

- a) Tenké: 2–6 cm, nenáročná extenzivní zeleň, například: sukulenty.
- b) Středně silné: 6–15 cm, středně náročná extenzivní zeleň, například: rozchodníky, netřesky a suchomilné traviny.
- c) Silné: 15–20 cm, náročná extenzivní zeleň, například: suchomilné trvalky.

Extenzivně založené střechy jsou zpravidla nepochozí. Využit je lze u všech sklonů střech, a to od plochých až po šikmé s velkým sklonem a strmé (Čermáková 2009).

Obr. 5: Extenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko (Greenville ©2013)



3.1.3.3 *Intenzivní jednoduchá střecha*

Tato kategorie se nachází mezi extenzivním a intenzivním ozeleněním. Jednou z charakteristik je větší výška substrátu (15–30 cm). Tato výška umožňuje výsadbu nejen rozchodníků, trav, bylin a trvalek, ale i keřů (brslen, jalovec). Stoupá však náročnost péče o vegetaci. Někdy je třeba dodatečné zavlažování a přihnojování.

Intenzivní jednoduché střechy jsou většinou pochozí (zejména ploché), mají však zvýšené nároky na technickou kontrolu (nutná 1–2krát ročně) (Čermáková 2009).

Obr. 6: Intenzivní jednoduchá zelená střecha; Green Ville, Brno, Česko (Greenville ©2013)



3.1.3.4 *Intenzivní zelená střecha*

Tento druh ozelenění je považován za nejnáročnější a nejdražší. Často jsou takové střechy srovnatelné se zahradou. Většinou má mocnost substrátu nad 30 cm a shora není omezená. V některých zdrojích jsou intenzivní jednoduché střechy klasifikovány jako intenzivní střechy. V tomto případě se předpokládá, že mocnost substrátu intenzivní zelené střechy začíná nad 15 cm. Libovolná výška substrátu umožňuje výsadbu vegetace téměř bez omezení. Je však důležité vzít v úvahu hloubku, kterou bude kořenový systém rostliny potřebovat. Rostliny s hlubokokořenícím systémem jsou proto považovány za nevhodnou volbu pro výsadbu na intenzivní střeše (ale ne nemožnou). S rostoucí výškou substrátu jsou kladeny vyšší nároky na zajištění statiky domu (Čermáková 2009).

Vzhledem k obrovským možnostem výběru vegetace je obvyklé ji rozdělit do dvou skupin podle náročnosti péče:

- a) Intenzivní jednoduchá – mocnost substrátu je 15 až 30 cm.
- b) Intenzivní nákladná – mocnost substrátu je nad 30 cm.

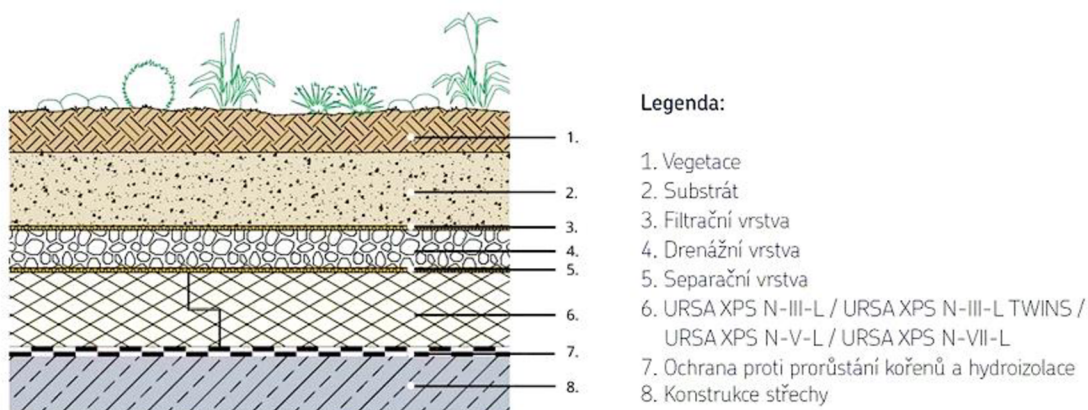
Tento typ ozelenění vyžaduje neustálou péči. Často se používá poloautomatický nebo plnoautomatický zavlažovací systém. Tyto střechy jsou většinou ploché a pochozí, což lze s výhodou využít při tvorbě odpočinkových zón. Technická kontrola by měla být prováděna minimálně 1–2krát ročně (Čermáková 2009).

Obr. 7: Intenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko (Greenville ©2013)



3.1.4 Skladba střešních pláštíků zelených střech

Obr. 8: Příklad skladby vrstev zelené střechy (Izolace-info ©2008)



Každá střecha se skládá z nosné konstrukce a střešního pláště.

Nosná konstrukce střechy – jedná se o soubor konstrukcí, jež jsou součástí střechy a staticky se vzájemně doplňují. Jejich hlavní funkcí je přenášet veškeré zatížení, zajišťují pevnost a stabilitu střechy.

Střešní plášť – skládá se z několika vrstev, které jsou vybrány podle účelu střechy. Konkrétně jde například o tepelnou izolaci, hydroizolaci, drenáž atd. Hlavní funkcí je chránit objekt před vnějšími vlivy.

Zelená střecha má kromě zmíněných klasických částí navíc vegetační souvrství. Souvrství je zkombinováno v závislosti na konkrétních požadavcích zvoleného typu zelené střechy.

Pro správnou volbu kombinace vrstev je nutné předem určit požadovanou střešní vegetaci. Pro její vhodný výběr jsou rozhodující: sklon střechy, mocnost substrátu a jeho vlastnosti, lokální klimatické podmínky, množství srážek a světla, pochůznost střechy atd. Každá vrstva má konkrétní specifickou funkci (Čermáková 2009).

Základní vrstvy a jejich funkce:

Vegetační vrstva – je nejsvrchnější vrstva, skládá se z fytoceózy rostoucí na střeše.

Substrát – je klíčovým prvkem pro vegetaci a náhradou přirozeného půdního profilu. Substrát poskytuje prostor pro kořeny a zásobuje je vodou, vzduchem a živinami. Volba závisí na typu nosné konstrukce a botanickém složení. Substrát musí být sterilní. Je také třeba vycházet z jeho mechanických vlastností: propustnost vody, stabilita v suchu a mrazu, náchylnost k erozi (Čermáková 2009).

Filtračně-separační vrstva – tato vrstva slouží především jako ochrana pro drenážní vrstvu, aby se drobné částice z vegetační vrstvy nedostaly do drenážní. Tato vrstva je umístěná na všech místech kontaktu substrátu s jinými vrstvami. Materiál této vrstvy nesmí být biologicky rozložitelný a musí plnit svou funkci bez ohledu na povětrnostní podmínky, nesmí omezovat růst kořenů (Bianchini et Hewage 2012).

Hydroakumulační vrstva – vrstva, která slouží k akumulaci vody. Tato vrstva se využívá, pokud vegetační vrstva nedokáže zadržet dostatečné množství vody pro rostliny. Hlavním požadavkem je možnost dosažení naakumulované vody kořeny rostlin (Bianchini et Hewage 2012). Čím větší je sklon střechy a tenčí je substrát, tím

větší je potřeba hydroakumulace. Hydroakumulační vrstva je proto nejčastěji určena pro šikmé a strmé střechy. Na střechách plochých je naopak vody zpravidla nadbytek.

Drenážní vrstva – je vrstva, jejíž úlohou je odvádění přebytečné vody k odvodňovacím prvkům (často se hromadí do speciálních dutin a pórů) (Šimečková et Večeřová 2010). Příliš velké množství vody v substrátu brání kořenům v přijímání kyslíku. V takovém případě může dojít k hnilobě kořenů. Využití drenážní vrstvy je ve většině případů relevantní pouze pro střechy s mírným sklonem nebo ploché.

Ochranná vrstva – jedna ze souvrství střešního pláště, jež slouží k ochraně proti mechanickému poškození a účinkům nepříznivých vnějších podmínek prostředí na hydroizolační vrstvu. V případě zelené střechy může také plnit funkce: ochrany proti prorůstání kořenů a ochrany proti mechanickému poškození způsobenému vlivem velkého zatížení (Šimečková et Večeřová 2010).

Hydroizolační vrstva – vrstva, která chrání spodní vrstvy střešního pláště, konstrukce střechy a obytné místnosti proti pronikání srážkové vody. U zelených střech je význam této vrstvy ještě větší než u střech klasických, protože rostliny vyžadují dodatečnou vodu. K tvorbě této vrstvy je potřeba přistupovat velmi pečlivě, neboť její opravy jsou velmi obtížné (Kotásková et Štěpán).

Tepelně izolační vrstva – zabraňuje unikání tepla z vnitřních částí domu a také vlivům vnějších teplot. V zimě nepropouští vnější chlad a v létě umožňuje nepřehřívání prostoru. Tepelná izolace se nejčastěji nachází pod hydroizolační vrstvou. U zelených střech slouží vegetační souvrství jako pomocná tepelné izolace a doplňuje ji (Scharf et Zluwa 2017).

Parozábrana – slouží k omezení pronikání vodní páry do dalších vrstev střešního pláště. Hlavním problémem vodní páry je, že proniká do střešního pláště a může tam kondenzovat. V těchto místech se daří houbám, plísním a případně korozi kovu.

Nosná konstrukce – tato konstrukce je popsána výše, viz začátek podkapitoly číslo 3.1.4.

3.1.5 Význam a funkce zelených střech

3.1.5.1 Enviromentální funkce

- Snížení teploty vzduchu (snížení tepelného ostrova města)

Tepelný ostrov je globální problém, který spočívá v tom, že teplota v centru města je vyšší než na okraji města nebo na venkově, a to o 1 až 2 stupně. Někdy může teplotní rozdíl dosáhnout 7 až 11 stupňů (nejčastěji v bezvětří v létě).

Rostliny mohou přispět ke snížení teploty vzduchu díky pohlcení energie. Aby se rostlina nepřehřívala, přes listy odpařuje vodu ve formě vodní páry. V tento moment fotosyntéza dosahuje maximální produkce. Chlazení je způsobeno vodou, která se hromadí v substrátu, to je bodem mezi přítokem srážkové vody a odběrem vody na transpiraci. Tento proces je nedílnou součástí koloběhu vody a energie na Zemi (Šír et al. 2003).

Bylo provedeno porovnání dopadu energie dle stanoviště. Výsledky ukázaly, že dopadající energie v parku je 9krát nižší než na podobné zastavěné ulici (Kavka et Šindelářová 1978).

- Zlepšení kvality ovzduší

Rostliny mají schopnost čistit vzduch. Dělají to několika způsoby – přijímají plynné znečišťující látky svými průduchy, zachycují částice svými listy a jsou schopné rozkládat určité organické sloučeniny, jako jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), ve svých rostlinných tkáních nebo v půdě (Baker et Brooks 1989).

Také vegetace může čistit vzduch nepřímou cestou. Snižuje teplotu vzduchu díky transpiraci nebo vytvoření stínu, což zpomaluje fotochemické reakce, ty způsobují znečišťující látky v atmosféře, například ozon (Rowe 2011).

V Chicagu zkoumali účinky vegetačních střech na znečištění ovzduší pomocí modelu suché despozice (dry deposition model). Tento experiment ukázal, že 19,8 hektarů zelených střech za rok vyčistilo 1 975 kg kontaminovaných látek, které obsahovaly 52 % – O₃, 27 % – NO₂, 14 % – PM₁₀, 7 % – SO₂. Nejvyšší míra očištění byla zaznamenána v květnu a nejnižší v únoru (klidová fáze) (Yang et al. 2008). Procento nepropustné zastavěné plochy v New Yorku je 64 %, zatímco v oblasti Mid-Manhattan West dosahuje 94 %. Střechy většinou zabírají 40 až 50 % nepropustné části. Proto by zelené střechy byly skvělým řešením tohoto problému (Dunnett et al. 2004).

- Retence dešťové vody

Zelená střecha může zadržet 50 až 95 % (někdy úplná eliminace) ročních srážek v závislosti na lokálních klimatických podmínkách, retenční schopnosti substrátu a výběru rostlin. Fungují jako úložiště, které z hydrologického hlediska imitují svrchní vrstvu půdy. Akumulace je zajištěna objemem pórů substrátu, drenážní vrstvou nebo vegetačním souvrstvím. To nese nejen environmentální funkci, ale také tu ekonomickou. Vegetační střechy přispívají k odlehčování kanalizačních systémů, protože akumulují část vody, poté ji vrátí do přirozeného koloběhu vody v přírodě ve formě vodní páry.

V poslední době se stále častěji objevuje otázka změny klimatu a sucho je jedním z důsledků. K vodě se přistupuje stále šetrněji, až 50 % použité pitné vody lze nahradit dešťovou vodou. Použít ji lze například na zavlažování zahrad, praní, úklid nebo na splachování WC (Schiefler 2005). Během přivalových dešťů vegetační střechy ukazují sílu svého potenciálu. Dokážou zadržet při počáteční nízké vlhkosti půdy dešťovou vodu o objemu 2–79 mm již při hloubce půdy 10 cm (Hilten et al. 2008).

- Náhradní plochy a životní prostor

S každým rokem se města více rozrůstají, což vede k antropogenním změnám životního prostředí a je přímou příčinou ohrožení biologické rozmanitosti z globálního hlediska (Güneralp et al. 2013). Zelené střechy mohou být částečným řešením tohoto problému a mohou nahradit zastavěné plochy pro různá zvířata a rostliny. Na vegetační střeše lze uměle vytvořit biotop pro endemické nebo ohrožené druhy (Lundholm 2006).

V Japonsku byl proveden výzkum související s kolonizací zelené střechy členovci. Byly zkoumány dva typy střech s extenzivní (Harappa Roof) a intenzivní (Biotope Roof) vegetací. Harappa Roof simulovala vegetaci pustin. Biotope Roof zahrnovala původní druhy rostlin a hostitelské rostliny pro členovce, vodní objekty a kameny. Nakonec se ukázalo, že druhové bohatství členovců na intenzivní střeše je podstatně větší než na extenzivní. Tento výzkum dokazuje, že střecha může sloužit jako přirozený biotop pro různé živočichy (Nagase et al. 2018).

Na zelené střeše lze také instalovat ptačí budky nebo hmyzí domky, tím podpořit místní biodiverzitu.

3.1.5.2 Ekonomická funkce

Vegetační střecha se od nejstarších dob používá jako izolace proti chladu nebo přehřátí. V moderní době může mít majitel takové střechy mnoho finančních výhod a úspor. V létě se sníží potřeba chlazení, protože vegetace pohltí velkou částku tepelné energie a zabrání přehřátí střechy. Bylo změřeno, že zelené střechy o 25 % snižují spotřebu energie na ochlazení místnosti v bytové jednotce přímo pod střechou (Saiz et al. 2006). V zimě naopak zelená střecha slouží jako dodatečná izolace proti chladu.

Ekonomickou výhodou zelené střechy je také ochrana střešní konstrukce před destrukcí kvůli působení UV záření a kolísání teplot. Vegetační souvrství chrání střechu proti mechanickému poškození a snižuje hlučnost. Tyto všechny body snižují náklady na provoz a rekonstrukci střechy a také prodlouží její životaschopnost.

Možné je i snížení tlaku na kanalizační systémy díky možnosti akumulace vody v substrátu zelených střech. Retenční schopnosti zelené střechy dosahují až 100% retence dešťové vody. Může to být obrovským ekonomickým přínosem: sníží to náklady na zařízení a procesy, které jsou spojené s kanalizací. Pro centrální „historické“ části města je důležité, kde jsou instalovány staré kanalizační systémy, které je velmi obtížně aktualizovat kvůli jejich nedostupnosti.

3.1.5.3 Estetická funkce

Zelené střechy mají i estetickou funkci. V zastavěných městech se staví stále méně „zelených“ zón, které příznivě ovlivňují psychologické zdraví obyvatel a slouží jako místo k odpočinku nebo trávení času. Vegetativní plochá intenzivní střecha může být takovým místem. Navíc tam může být otevřená pracovní zóna – coworking space. Může jít například o park na střeše, kde lidé budou odpočívat. Zelená střecha by mohla být místem, kde by se lidé seznámili s ekologickými problémy.

Intenzivní střecha nemá téměř žádná omezení pro její použití. Vegetační střecha zlepšuje vzhled střechy. Je příjemnější se na ni dívat, protože tolik neodráží slunce jako plechová střecha (Šimečková et Večeřová 2010).

3.2 Biochar

Biochar je jedním z konečných produktů termochemického procesu zpracování biomasy. Existují čtyři hlavní způsoby výroby biocharu: pomalá pyrolýza, rychlá pyrolýza, torrefikace a zplyňování. Biomasa může mít několik různých původů:

zemědělský odpad, lesnické zbytky, tuhý komunální odpad a další. Různé způsoby získávání a primární materiály činí biochar univerzálním a vhodným pro různé oblasti – od těžké metalurgie až po čištění půdy a vzduchu.

3.2.1 Historie biocharu

Biochar je znovuzrozený materiál, který má dlouhou historii. Stopy biocharu se nacházejí v půdách po celém světě, kde je důsledkem lesních a lučních požárů (Krull et al. 2008; Skjemstad et al. 2002).

Použití biocharu lze vysledovat o tisíce let zpět. Existují důkazy, že před tisíci lety v povodí Amazonky domorodí lidé vyráběli a používali biochar jako hnojivo půdy pro zvýšení její úrodnosti a zvýšení výnosu plodin. Terra Preta a Terra Mulata jsou antropogenní půdy, ve kterých byly nalezeny důkazy o rozsáhlém využívání biocharu. Překvapivě i přes silné tropické deště zůstává tato oblast stále velmi úrodná (O'Neill 2009).

Obr. 9: Terra Preta (vlevo) a Oxisol (vpravo) (Glaser et al. 2001)



Biochar nezůstal bez povšimnutí ani v Asii. Nejstarší důkazy o použití biocharu v Asii pocházejí z Číny, kde byl používán již za dynastie Han (206 př. n. l. až 220 n. l.). Tehdy se tento materiál používal k výrobě izolačních pásů pro pohřbívání těl, díky nim byl blokován proces výměny s vnějším prostředím a tělo bylo zachováno po tisíce let (Zhang et al. 2019).

V období 1980–1990 začala moderní historie biocharu, když ho vědci začali studovat jako potenciální řešení problémů spojených s kvalitou půdy a uhlíkovým pohlčováním. Po roce 2000 zájem zesílil a pokračoval v růstu, protože se objevily práce dokazující, že biochar může zlepšit strukturu půdy, snížit emise skleníkových plynů a zmírnit dopady změny klimatu.

3.2.2 Výroba biocharu

Biochar je pevný materiál, který se získává zahříváním biomasy. Díky tomuto procesu, který se nazývá pyrolýza, konečný produkt obsahuje stabilní formu uhlíku, jež může být později použit pro různé účely.

Existuje několik možností výroby biocharu:

3.2.2.1 Pomalá pyrolýza

Pomalá pyrolýza je jednou z nejrozšířenějších metod získávání biocharu. Je to proces, při němž se biomasa zahřívá při relativně nízké teplotě – nejčastěji mezi 350 a 500 stupni, ale někdy může teplota dosáhnout i 700 stupňů. Zahřívání trvá několik hodin. Jedním z hlavních faktorů kvality biocharu je množství uhlíku v konečném produktu, nelze ale zapomenout ani na význam pH, obsah živin a pórovitost (Shackley et al. 2014). Důležitými body pomalé pyrolýzy jsou teplota a rychlost ohřevu. Při vyšších teplotách se zvyšuje obsah uhlíku v biocharu. Při pomalejším zahřívání dochází k větší usazenosti uhlíku, tím se zvyšuje produkce biocharu.

Pyrolýzní olej je jedním z vedlejších produktů při výrobě biocharu. Při pomalé pyrolýze se uvolňují kondenzační složky, které lze sebrat ve formě pyrolýzního oleje. Je to kapalná směs organických sloučenin (včetně cukrů, kyselin, alkoholů a aldehydů), které lze použít jako zdroj energie. Tento olej je možné dále zpracovávat za účelem výroby biopaliv, chemikálií nebo jiných produktů s přidanou hodnotou (Setter et al. 2020).

Pyrolýzní olej je cenným produktem, ale je důležité vzít v úvahu důsledky jeho výroby a používání. Například výroba a používání bionafty může přinést emise skleníkových plynů. Náklady na zpracování pyrolýzního oleje mohou být vyšší než cena výsledného produktu.

3.2.2.2 Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza (na rozdíl od té pomalé) má velmi vysokou rychlost ohřevu. Průměrná rychlost tohoto procesu dosahuje 1 000 °C/min. Biomasa se zahřívá na teplotu 500–700 stupňů. Biochar je vedlejším produktem rychlé pyrolýzy – vzhledem k tomu, že se při vysokých teplotách uvolňuje více syntetických plynů než tvrdého produktu. Také se připravuje i chlazený kondenzát ve formě pyrolýzního oleje (Wang et al. 2020).

Rychlá pyrolýza má také své negativní stránky, jsou jimi například velmi vysoké náklady na výrobu a provoz speciálních reaktorů odolných vůči vysoké teplotě, stejně jako náklady na zajištění složitých systémů řízení procesu rychlé pyrolýzy. Kromě toho mohou vysoké teploty zapojené do procesu vést k produkci nežádoucích vedlejších produktů, které mohou negativně ovlivnit životní prostředí a kvalitu konečného produktu.

3.2.2.3 Torrefikace

Torrefikace je termochemický proces, při kterém dochází k ohřevu biomasy na relativně nízké teploty po delší dobu. Teplota se pohybuje mezi 200–300 stupni. Rychlost ohřevu je nízká – méně než 50 stupňů/min. Proces probíhá v prostředí bez přístupu kyslíku. Doba trvání torrefikace je 20 až 120 minut. Během procesu se objeví vedlejší produkt ve formě torrefikované páry. Výsledkem je materiál se zlepšenými fyzikálními a chemickými vlastnostmi ve srovnání s nezpracovanou biomasou, díky čemuž je vhodný pro různé aplikace, a to včetně výroby energie. Tímto konečným produktem je torrefikovaný biochar (Vreugdenhil et al. 2015).

Vlastnosti primární biomasy mají jednu z klíčových rolí pro kvalitu konečného produktu. Je důležité vzít v úvahu hustotu, obsah vlhkosti a další fyzikální a chemické vlastnosti biomasy.

Neméně důležitým parametrem je délka procesu. Čím déle dochází k torrefikaci při optimálních teplotách, tím více těkavých látek se odpařuje a obsah uhlíku v pevném produktu se zvyšuje.

Torrefikace je slibná technologie, ale vyžaduje ještě podrobné prozkoumání.

Je známo, že díky torrefikaci má konečný produkt delší trvanlivost a pomaleji se rozkládá ve srovnání s primární biomasou. Díky tomu je torrefikovaný biochar životaschopnou možností pro dlouhodobé pohlcování uhlíku (Niu et al. 2019).

3.2.2.4 Zplyňování

Zplyňování je procesem částečné tepelné oxidace biomasy. Zplyňování vyžaduje vysoké teploty a často probíhá při teplotě 700 až 1 000 stupňů. Pro tento proces jsou důležitá oxidační činidla, která se nazývají gasifying agents (zplynovací činidla). Těmito agenty jsou nejčastěji vzduch, čistý kyslík nebo pára. Hlavním konečným produktem jsou plynné látky – CO₂, oxid uhelnatý, vodík a plynné uhlovodíky. Vedlejšími produkty jsou biochar a pyrolýzní olej (Puig-Arnabat et al. 2010).

Pokud je zplyňování považováno za zdroj získávání biocharu, je třeba vzít v úvahu několik parametrů, které přímo souvisejí s kvalitou výsledného produktu. Je to složení, kvalita a vlastnosti původní biomasy, tlak, volba zplynovacího činidla a koeficient ekvivalence. Poslední z nich je považován za nejdůležitější, protože s jeho zvýšením stoupá teplota zplyňování. Čím vyšší je teplota procesu, tím méně bude ve výsledku získáno biocharu. Také zvýšení tohoto koeficientu vede k tomu, že proces bude probíhat rychleji a v důsledku toho bude biochar obsahovat méně uhlíku, což znamená, že jeho kvalita klesne. Na druhou stranu ale má zvýšení tohoto parametru své výhody, které dávají smysl, pokud je cílem procesu získat co nejvíce látek v plynné formě (Shackley et al. 2014).

3.2.3 Vlastnosti biocharu

Biochar má mnoho chemických a fyzikálních vlastností, které jsou korelovány v závislosti na původní surovině, zvolené metodě získávání, teplotě a rychlosti ohřevu, tlaku a délce procesu atd.

3.2.3.1 Chemické vlastnosti biocharu

- pH

Je jedním ze základních chemických parametrů biocharu. Může mít vliv na pH půdy, což je významná výhoda pro zemědělství. Když se biochar přidá do kyselé půdy, může pomoci zvýšit pH a učinit půdu zásaditější. Pokud se biochar naopak přidá do zásadité půdy, může pomoci snížit pH a učinit půdu kyselejší. Vodíkový exponent biocharu závisí na původní surovině, teplotě a délce procesu (Weber et Quicker 2018).

Biochar, který se získává ze surovin s vysokým obsahem popela, jako je sláma, může být zásaditější, zatímco biochar získaný ze surovin s vysokým obsahem ligninu, jako je dřevo, může být kyselější. Při výběru biocharu pro práci s kyselostí půdy je proto důležité vzít v úvahu, z čeho byl získán.

Důležitou roli hraje způsob získávání biocharu. Například při pyrolýze se při vyšších teplotách často uvolňují kyselější skupiny látek a jako pevný zbytek ve formě biocharu zůstávají skupiny látek s vyššími hodnotami pH (zásaditější). V důsledku toho je vysoká hodnota vodíkového exponentu výsledkem vyššího stupně karbonizace. Nejvyšší hodnoty lze dosáhnout při teplotách nad 500 stupňů. Vzhledem k tomu je teplota jedním z hlavních faktorů ovlivňujících vodíkový exponent (Brewer et Brown 2012).

Dále je třeba poznamenat, že vliv může mít i délka procesu. Délka trvání je totiž přímo spojena s množstvím získaného konečného pevného produktu a obsahem uhlíku v něm. Na druhou stranu je známo, že kyselé skupiny se uvolňují během prvních 5–15 minut. K výrobě biocharu se nejčastěji používají delší metody, proto délka nemá natolik velký význam.

Zároveň jsou na povrchu biocharu záporně nabitě skupiny, které vážou ionty H^+ z půdy, což vede k snížení její kyselosti a stoupání pH.

- Uhlík

Biochar je stále více vnímán jako technologie, která má při přidávání do půdy mnoho ekologických výhod. Jednou z nich je vazba uhlíku (C) v půdě. Biochar je považován za udržitelnou formu uhlíku s průměrnou dobou zdržení (MRT – the mean residence time) v rozmezí staletí až tisíciletí (Kuzyakov et al. 2009).

Jednou z nejdůležitějších vlastností biocharu je jeho vysoký obsah uhlíku, který se může pohybovat od 30 do 95 % v závislosti na výrobním procesu a zdrojových surovinách. Uhlík obsažený v pevném produktu po odstranění těkavých látek se nazývá pevný uhlík. Pro různé účely je potřeba různé množství C v biocharu. Například metalurgie vyžaduje velmi vysoké procento, tedy 90 % a více.

Zpočátku biomasa obsahuje přibližně 10 až 30 % uhlíku v závislosti na jejím složení (250–450 stupňů je nejúčinnější). V tomto teplotním intervalu se množství pevného uhlíku zvyšuje na 60 %. Pro získání velmi vysokého obsahu C, například pro metalurgické účely, je nutná teplota 700 stupňů a vyšší (Weber et Quicker 2018).

Stabilita biocharu je způsobena vysokým obsahem uhlíku, díky čemuž je aromatický a nereaguje s jinými látkami. Stupeň stability se liší v závislosti na původní surovině a podmínkách pyrolýzy. Biochar získaný při vysokých teplotách je však obecně aromatičtější a stabilnější.

Kromě toho může uhlík v biocharu fungovat jako zdroj živin pro rostliny a zlepšit úrodnost půdy, což z něj činí atraktivní možnost pro udržitelné zemědělství.

- Chemická stabilita

Jak bylo zmíněno výše, biochar má vysokou úroveň stability. Ta se zase objevuje po pyrolytické přeměně biomasy pomalým ohřevem. Tento proces se nazývá karbonizace nebo extrémní pyrolýza. V tomto procesu je množství uhlíku v pevném zbytku vysoké (Strezov et al. 2007). Také v důsledku karbonizace se oddělují funkční skupiny a uvolňuje se kyslík (O) a vodík (H). Biochar s nízkým poměrem H/C obsahuje méně funkčních skupin více aromatických struktur, což odpovídá vyššímu stupni karbonizace. Tato vlastnost má obrovskou výhodu pro použití biocharu v zemědělství, protože je odolným produktem proti biologickému rozkladu. Biochar je dlouhodobým zdrojem pohlcování uhlíku v půdách, protože aromatické sloučeniny mohou zůstat v půdě po mnoho let bez štěpení mikroorganismy.

Předpokládá se, že biochar obsahuje alespoň dvě různé aromatické struktury: amorfni a krystalická fáze. Aromaticnost zahrnuje obě fáze a charakterizuje celkové množství uhlíku v aromatických strukturách. Aromaticnost se úměrně zvyšuje s množstvím uhlíku při zvýšených teplotách pyrolýzy, jak je popsáno výše v odstavci o uhlíku.

Stabilita biocharu je také ovlivněna jeho schopností odolávat oxidaci. Za podpory čínského národního fondu přírodních věd byl proveden výzkum zkoumající vliv minerálů na stabilitu biocharu. Tato studie zkoumala především vliv endogenních minerálů na stabilitu biocharu. Výsledky ukázaly, že aromatické C a endogenní minerály ovlivňují odolnost biocharu vůči oxidaci, což znamená ještě větší stabilitu (Yang et al. 2018).

3.2.3.2 Fyzikální vlastnosti biocharu

- Pórovitost

Jednou z nejdůležitějších fyzikálních vlastností biocharu je pórovitost.

Pórovitost se projevuje přítomností dutin a mezer mezi pevnými částicemi v biocharu. Může mít různé množství a velikost pórů v závislosti na původní surovině a způsobu výroby.

Biochar vyrobený ze zemědělského odpadu má pórovitost nižší než ten, který byl vyroben ze dřeva, protože původní biomasa měla odlišné složení a strukturu. Zároveň je při rychlé pyrolýze pórovitost menší než při pomalé pyrolýze, to je způsobeno především rychlostí ohřevu a délkou procesu, což se odráží na vlastnostech konečného produktu.

Póry lze rozdělit do tří hlavních kategorií: mikropóry ($< 2 \mu\text{m}$), mezopóry ($2\text{--}50 \mu\text{m}$) a makropóry ($> 50 \mu\text{m}$). Každá z těchto odrůd má své výhody a odráží se na dalších cílech použití biocharu (Weber et Quicker 2018).

Mikropóry jsou důležité pro vazbu uhlíku, což je rozhodující ekologický aspekt pro použití biocharu v zemědělských odvětvích. Vytvářejí místa pro chemické reakce, což zlepšuje katalytické vlastnosti biocharu.

Mezopóry zvyšují adsorpční vlastnosti, což umožní pohlcování těžkých kovů a organických nečistot. Poskytují také místa pro výměnu živin.

Makropóry zvyšují hydroakumulační schopnosti biocharu, což je užitečné při řešení problému sucha a může sloužit jako zdroj vody pro rostliny. Zlepšují i schopnost výměny plynu.

Stojí za zmínku, že struktura biocharu se skládá hlavně z mikropórů, které často zabírají více než 80 % celkového objemu pórů. V nezpracované biomase složené ze slámy a stonků je pro srovnání počet mikropórů menší než 10 % celkového objemu pórů (Weber et Quicker 2018).

- Retence vody

Stěžejní vlastností biocharu je jeho schopnost retence vody. Retence je velmi významným přínosem při aplikaci biocharu na zlepšení půdy. Tato vlastnost přímo přispívá k produktivitě pěstování zemědělských plodin, protože substrát, který zadržuje vodu, je stálým zdrojem vody pro vegetaci. To také snižuje náklady na dodatečnou hydrataci, specializované zavlažovací systémy a logistiku pro přepravu vody.

Nyní lze nalézt mnoho studií, které dokazují, že biochar má velmi vysokou schopnost zadržovat vodu. Existují však i experimenty, které ukázaly opačné výsledky. Retence vody biocharem vyžaduje další studium, protože tato schopnost se mění v závislosti na surovinách a způsobu výroby konečného produktu.

Ke studiu se používají především tři základní hydrologické proměnné spojené se zadržováním vlhkosti v půdě: polní vodní kapacita (PVK), bod vadnutí (BV) a využitelné vodní kapacity (VVK).

PVK – maximální kapacita vody (vlhkosti), kterou je půda schopná udržet po infiltraci proti gravitační síle. Je to bod, v němž je půda maximálně nasycena vodou, aby přebytečná voda odtékala. Půda je schopna poskytnout rostlinám dostatečné množství vody pro jejich růst a vývoj.

BV – bod půdní vlhkosti, kdy rostliny nemohou extrahovat vodu z půdy, nedostávají jí dostačující množství a začínají vadnout. Důvodem je vysoká suchost. Voda je pevně držena částicemi půdy a rostliny nemají dostatečný sací tlak, aby vodu získaly.

VVP – hodnota určující maximální množství vody, které může rostlina využít v daném konkrétním půdním profilu. Je rozdílem polní vodní kapacity a bodem vadnutí.

$$VVP = PVK - BV$$

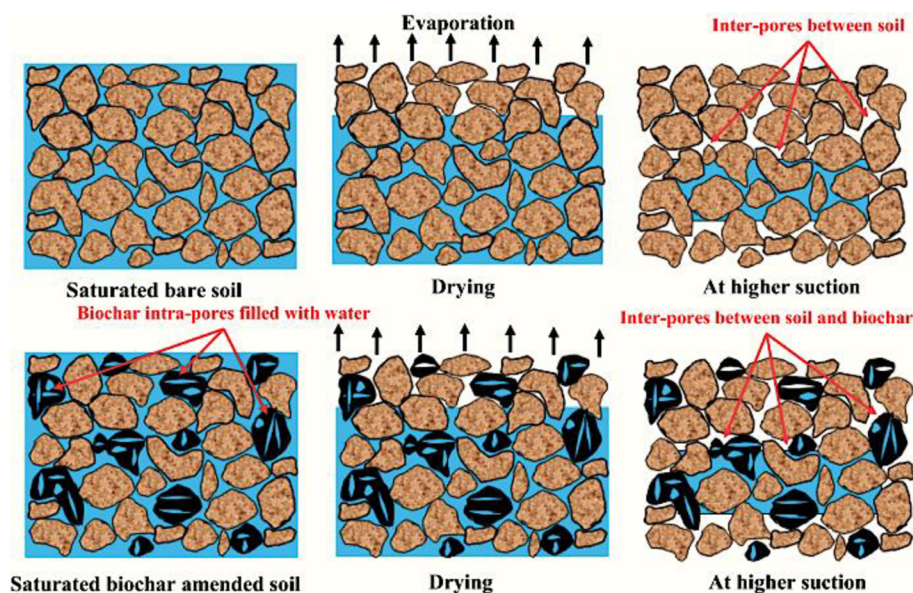
PVK se vypočítává velmi jednoduchou metodou: měřením hmotnosti vzorku půdy před a poté, co byl nasycen vodou a ponechán odtéct do kapacity pole. Rozdíl v hmotnosti bude ukazatelem PVK. V laboratoři se bod vadnutí obvykle stanoví umístěním známého množství půdy do nádoby a jejím ponecháním zaschnout, dokud rostlina nezačne vadnout. V tomto bodě se měří obsah vlhkosti půdy a tato hodnota se bere jako BV. Po určení těchto dvou veličin se vypočítá VVP podle vzorce, který je uveden výše.

V článku Razzaghi et al. 2020 se porovnávají parametry související s retencí vody v půdě před a po aplikaci biocharu. Biochar výrazně zvýšil (o 51 %) polní vodní kapacitu u půd s hrubou strukturou. U středně strukturované půdy se tento parametr zvýšil o 13 % po aplikaci biocharu. Nicméně u jemně strukturovaných půd se PVK téměř nezměnil. Studie zjistila, že použití biocharu zvýšilo BV o 47 % u půd s hrubou strukturou, o 9 % u středně strukturované půdy, ale u jemně strukturovaných půd klesl o 5 %. Z uvedeného souhrnu plyne, že aplikace biocharu změnila VVP: u půd s hrubou

strukturou stoupal o 45 %, u půd se střední strukturou stoupal o 21 % a půd s jemnou strukturou stoupal o 14 %.

Tato studie ukazuje závislost účinnosti retence vody při aplikaci biocharu na hrubost struktury půdy (Kohut et al. 2010).

Obr. 10: Srovnání retenční schopnosti běžné půdy a půdy s přidáním biocharu (Hussain et al. 2020)



3.2.4 Aplikace biocharu na zelených střechách

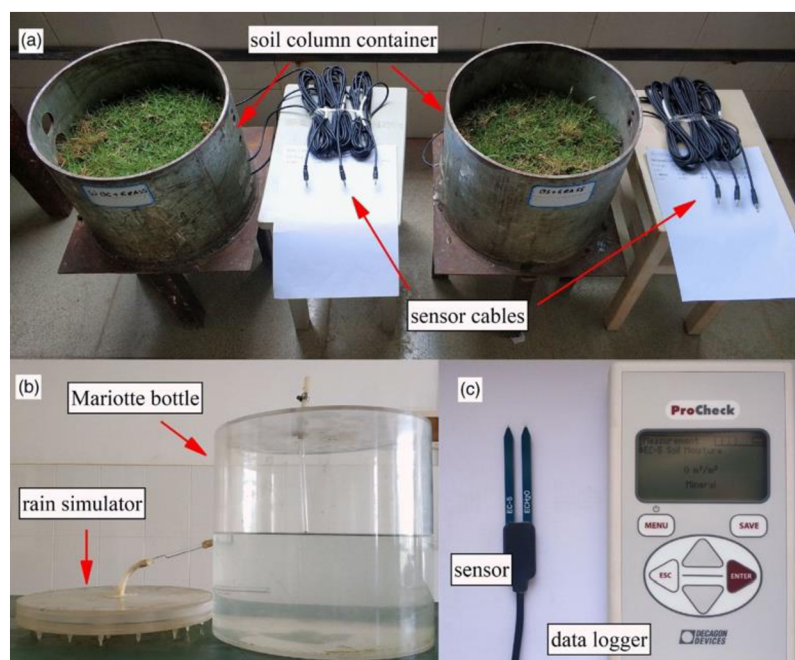
Biochar je progresivním výrobkem, který má z ekologického a ekonomického hlediska velmi důležité vlastnosti. Díky své struktuře dokáže zadržovat a akumulovat vodu jako houba. Z tohoto důvodu je vynikajícím materiálem pro boj s dlouhodobým suchem a nadměrnými srážkami.

Podobné výhody má i další ekologická technologie – zelená střecha. Ta se stává nedílnou součástí moderní architektury. Ekosystém zelené střechy je složitý systém, který často vyžaduje velké investice a péči. Nedostatek vody v substrátu na střeše není vzácným problémem. Biochar má dobré retenční schopnosti, proto je jedním z řešení tohoto problému.

Huang et al. 2020 ve své studii hodnotil hydrologické vlastnosti zelených střech po aplikaci biocharu. Výzkum probíhal v laboratorních podmínkách s experimentálními válcovými sloupci, které měly výšku 25 cm a průměr 30 cm. Imitovaly zelenou střechu

s výškou substrátu 15 cm. Byl také vyvinut systém pro imitace srážek, díky kterému pršelo s konstantní rychlostí 0,4 mm/min. Biochar byl vyroben z cedru při teplotě 750 stupňů. Pro každý sloupec byl vybrán vlastní substrát: s holou půdou (**HP**), s holou půdou a biocharem (**HPB**), s půdou s vegetací (**VP**), s půdou s vegetací modifikovanou biocharem (**VPB**). Každý substrát byl zavlažován stejným množstvím srážek během jednoho měsíce. Vyhodnocení hydrologických parametrů bylo provedeno pomocí HYDRUS-1D – což je software pro modelování toku vody, přenosu rozpuštěných látek v pórovitých prostředích atd., který čerpá a řeší Richardsovu rovnici. V důsledku experimentu bylo zjištěno, že sloupec **VPB** měl nejlepší retenční schopnost díky pórovitosti biocharu a vegetaci. Výzkum také ukázal, že půdy s vegetací (**VP** a **VPB**) mají vyšší rychlost pronikání vody přes póry a trhliny (hydraulická vodivost) než holé půdy (**HP** a **HPB**), je to kvůli tomu, že vegetace vytváří trhliny a ani biochar je nedokáže zcela zaplnit. Tato studie je důkazem toho, že biochar skutečně dobře zadržuje dešťovou vodu na zelených střechách a zvyšuje její účinnost. Má však své slabé stránky a vyžaduje další průzkum.

Obr. 11: Testovací nastavení a senzory (a – půdní sloupec; b – simulátor srážek; c – senzor a záznamník dat) (Huang et al. 2020)



Cílem studie provedené Tan et Wang 2023 bylo ověřit, zda substrát s přídavkem biocharu zlepšuje hydrotermální vlastnosti zelené střechy. V experimentu byly použity

dva druhy biocharu s různou velikostí částic (0,25 mm a 1 mm) vyrobené pyrolýzou biomasy z dřevěného odpadu. Biochar byl aplikován do půdy v poměru 0 %, 10 % a 20 % (**0B**, **10B**, **20B**). Po měření vlhkosti bylo zjištěno, že přidání doplňku ve formě biocharu výrazně zvýšilo retenční schopnosti substrátu. Analogicky se změnila i pórovitost: čím větší dávka doplňku byla přidána, tím vyšší byla pórovitost substrátu: **0B** < **10B** < **20B**. Také pro ověření funkčnosti biocharu byly vytvořeny čtyři konstrukce v podobě nebytových budov se sklonem střechy 2 %. Byly aplikovány čtyři různé druhy substrátu: bez přidaného biocharu (**B0**), 10 % hrubého biocharu (**B10H**), 20 % hrubého biocharu (**B20H**), 20 % jemného biocharu (**B20J**). Pro sběr dat o množství a době srážek byla zařízena meteorologická stanice. Experiment ukázal, že čím více biocharu bylo přidáno do substrátu, tím menší byla rychlost odtoku dešťové vody, ale čím hrubší jsou částice biocharu, tím větší je rychlost odtoku. To dokazuje, že v závislosti na velikosti svých částic biochar zadržuje vodu v substrátu zelených střech.

Obr. 12: Pohled na experimentální stavební buňky (Tan et Wang 2023)



Mnoho studií ukazuje výhodnost použití biocharu jako půdního aditiva pro substrát vegetačních střech. Je nutné pečlivě přistupovat k výběru samotného výrobku v závislosti na účelu jeho použití. Pro snížení odtoku dešťové vody je lepší dát přednost jemnému biocharu.

Chen et al. 2018 studoval vliv biocharu na změny regulace vlhkosti a teploty, růst rostlin a změny mikrobiálních komunit v substrátu zelených střech a pozemních

substrátech. Biochar, který byl použit v experimentu, byl získán z biomasy usazeného kalu (z kalových odpadních vod). Pyrolýza proběhla při teplotě 600 stupňů. Experiment zahrnoval pět druhů substrátu: přírodní půdy (PP), směsi místní přírodní půdy a 5 % kalového biocharu (5 % KB), 10 % kalového biocharu (10 % KB), 15 % kalového biocharu (15 % KB) a 20 % kalového biocharu (20 % KB). Bylo vytvořeno pět maket zelené střechy s hloubkou substrátu 25 cm. Každý druh substrátu byl umístěn na střeše i na zemi.

Výsledky výzkumu jsou uvedeny v tabulce číslo 2.

Tab. 2: Fyzikální a chemické vlastnosti střešních a zemních podkladů při různých rychlostech přidavků biocharu (Chen et al. 2018)

	Rate of biochar	DBD (kg L ⁻¹)	SBD (kg L ⁻¹)	WHC (%)	AFP (%)	pH	TC (g kg ⁻¹)	TN (g kg ⁻¹)	TP (g kg ⁻¹)	TK (g kg ⁻¹)
Roof	0%	1.09 ± 0.11	1.57 ± 0.12	44.23 ± 0.12	57.88 ± 0.02	8.27 ± 0.07	19.57 ± 0.3	1.28 ± 0.02	1.02 ± 0.01	1.23 ± 0.02
	5%	1.02 ± 0.07	1.52 ± 0.21	47.16 ± 0.22	60.28 ± 0.09	7.86 ± 0.13	22.57 ± 0.6	1.36 ± 0.03	1.12 ± 0.05	1.28 ± 0.01
	10%	0.98 ± 0.06	1.47 ± 0.12	52.66 ± 0.11	61.27 ± 0.06	7.42 ± 0.03	28.25 ± 0.8	1.42 ± 0.06	1.26 ± 0.03	1.32 ± 0.04
	15%	0.96 ± 0.10	1.46 ± 0.05	56.86 ± 0.08	61.93 ± 0.16	7.36 ± 0.05	27.59 ± 0.3	1.52 ± 0.02	1.32 ± 0.06	1.38 ± 0.03
	20%	0.94 ± 0.03	1.42 ± 0.17	59.51 ± 0.02	62.87 ± 0.18	7.35 ± 0.06	29.67 ± 0.6	1.73 ± 0.01	1.37 ± 0.02	1.42 ± 0.07
Ground	0%	1.08 ± 0.12	1.56 ± 0.09	44.24 ± 0.03	57.86 ± 0.06	8.25 ± 0.12	21.66 ± 0.7	1.32 ± 0.06	1.11 ± 0.06	1.26 ± 0.02
	5%	1.01 ± 0.08	1.52 ± 0.17	47.16 ± 0.02	60.27 ± 0.02	7.96 ± 0.19	23.55 ± 0.5	1.43 ± 0.01	1.25 ± 0.07	1.30 ± 0.05
	10%	0.99 ± 0.02	1.47 ± 0.02	52.65 ± 0.06	61.29 ± 0.11	7.87 ± 0.02	31.15 ± 0.6	1.51 ± 0.05	1.35 ± 0.03	1.35 ± 0.02
	15%	0.98 ± 0.16	1.45 ± 0.06	56.87 ± 0.10	61.95 ± 0.15	7.82 ± 0.11	33.59 ± 0.2	1.66 ± 0.03	1.39 ± 0.09	1.38 ± 0.06
	20%	0.94 ± 0.09	1.43 ± 0.05	59.49 ± 0.03	62.88 ± 0.21	7.65 ± 0.21	34.77 ± 0.5	1.79 ± 0.04	1.43 ± 0.08	1.41 ± 0.03
P-values	Biochar	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Environment	0.488	0.829	0.862	0.343	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.005
	Interaction	0.283	0.658	0.948	0.209	<0.001	<0.001	0.022	0.003	0.640

Poznámka: DBD = suchá sypaná hmotnost, SBD = nasycená sypaná hmotnost, WHC = kapacita zadržování vody v půdě, AFP = vzduchem naplněná pórovitost, dva druhy prostředí (střecha a zem), SP = pórovitost půdy, pH=kyselost půdy, TC = celkový uhlík, TN = celkový dusík, TP = celkový fosfor, TK = celkový draslík, roof = střecha, ground = zem.

Výsledky studie ukazují, že biochar má vliv na retenční schopnosti substrátu, což ukazuje kapacita zadržování vody v půdě (WHC). Roste s množstvím přidaného biocharu. Zajímavé je, že tento parametr nemá prakticky žádnou závislost na umístění: na střeše nebo zemi.

Chen et al. 2021 zkoumal fyzikální a chemické vlastnosti substrátu pro zelené střechy při pěti gradientních poměrech přidání biocharu: 0 % B, 5 % B, 10 % B, 15 % B, 20 % B. Biomasa, ze které byl biochar vyroben, byla zpracována sušením a pyrolýzou při 600 stupních. Aluviální půda, která byla použita v experimentu, byla odebrána z přirozeného místa, vysušena na vzduchu, rozdrčena a proseta sítem o velikosti buněk 0,3 mm. Bylo vyrobeno pět konstrukcí o rozměrech (0,3 m × 1 m) s hloubkou substrátu 25 cm.

Výsledky výzkumu jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Tab. 3: Fyzikálně-chemické vlastnosti půdy zelené střechy (Chen et al. 2018)

Treatments	DBD (kg L ⁻¹)	WHC (%)	SP (%)	pH	TC (g kg ⁻¹)	TN (g kg ⁻¹)	TP (g kg ⁻¹)	TK (g kg ⁻¹)
CK	1.02 ± 0.02 a	43.56 ± 0.17 e	58.32 ± 0.06 d	8.17 ± 0.03 a	19.63 ± 0.15 e	1.38 ± 0.03 e	0.96 ± 0.06 c	1.15 ± 0.06 d
5%SB	0.98 ± 0.03 b	49.66 ± 0.12 d	61.38 ± 0.05 c	7.67 ± 0.02 b	24.57 ± 0.08 d	1.76 ± 0.01 d	1.02 ± 0.03 c	1.23 ± 0.03 cd
10%SB	0.95 ± 0.02 bc	55.72 ± 0.21 c	62.77 ± 0.08 b	7.32 ± 0.01 c	29.65 ± 0.16 c	2.53 ± 0.02 c	1.15 ± 0.02 b	1.32 ± 0.06 bc
15%SB	0.93 ± 0.01 cd	57.23 ± 0.18 b	63.63 ± 0.12 a	7.28 ± 0.02 cd	28.99 ± 0.12 b	2.75 ± 0.05 b	1.21 ± 0.03 ab	1.39 ± 0.07 b
20%SB	0.91 ± 0.02 d	59.76 ± 0.22 a	63.76 ± 0.13 a	7.25 ± 0.03 d	31.16 ± 0.11 a	2.97 ± 0.06 a	1.23 ± 0.01 a	1.56 ± 0.03 a

Treatments	AN (mg kg ⁻¹)	AP (mg kg ⁻¹)	AK (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Soil Water (%)	Soil Temperature (°C)	SWM (%)	SMT (°C)
CK	9.32 ± 0.15 e	6.43 ± 0.06 e	10.12 ± 0.16 e	9.17 ± 0.66 d	31.63 ± 0.32 d	11.62 ± 0.12 e	46.6 ± 0.26 a	21.5 ± 0.25 e
5%SB	12.11 ± 0.08 d	6.83 ± 0.03 d	10.82 ± 0.11 d	12.66 ± 1.06 c	33.71 ± 0.21 c	12.15 ± 0.15 d	45.3 ± 0.17 c	23.8 ± 0.19 d
10%SB	13.23 ± 0.16 c	7.71 ± 0.08 c	11.62 ± 0.09 c	14.26 ± 1.02 b	37.96 ± 0.63 b	13.72 ± 0.29 c	41.3 ± 0.11 e	30.7 ± 0.16 a
15%SB	15.65 ± 0.06 b	8.11 ± 0.11 b	12.23 ± 0.12 b	15.57 ± 0.95 ab	38.65 ± 0.56 b	15.23 ± 0.18 b	43.8 ± 0.16 d	29.6 ± 0.22 b
20%SB	17.72 ± 0.06 a	8.26 ± 0.09 a	13.73 ± 0.22 a	16.13 ± 0.58 a	49.52 ± 0.37 a	16.86 ± 0.26 a	44.9 ± 0.23 b	27.7 ± 0.32 c

Poznámka: CK= 0 % B, DBD = suchá sypaná hmotnost, WHC = kapacita zadržování vody v půdě, SP = pórovitost půdy, pH=kyselost půdy, TC = celkový uhlík, TN = celkový dusík, TP = celkový fosfor, TK = celkový draslík, AN = dostupný dusík, AP = dostupný fosfor, AK = dostupný draslík, CEC = kapacita výměny kationtů, SWM = půdní voda při maximální teplotě půdy v létě a SMT = maximální teplota půdy v létě; ± S. e. (± standardní chyba).

Studie prokázaly růst retenční schopnosti substrátu po přidání biocharu. Nevyšší nárůst byl pozorován po přidání 5 % biocharu. Při dalším zvýšení objemu biocharu v substrátu retenční schopnosti dále rostly, ale již méně výrazně. Přidání 5 % biocharu se ukázalo jako optimální.

4. Metodika

4.1 Substrát pro extenzivní střechy

Na extenzivní zelené střeše se používají dva druhy pěstebního média vyrobeného společností. BB Com s.r.o. První je extenzivní střešní substrát Florcom (SSE), druhý je stejný substrát s přidáním biocharu s obchodním názvem ROOFChar (SSE-B). Substrát SSE je převážně navržen pro extenzivní zelené střechy se zaměřením na suchomilné rostliny. Za zmínku také stojí, že extenzivní střešní substrát Florcom obsahuje bezplevelný kompost, který zvyšuje retenční schopnosti pěstebního média. Tento substrát odpovídá požadavkům německé metodiky FLL.

Parametry extenzivního střešního substrátu Florcom (SSE):

Tab. 4: Vlastnosti extenzivního střešního substrátu Florcom (SSE) uvedené výrobcem BB COM s.r.o., 2021 (BB COM s.r.o. ©2022)

Parametry substrátu SSE	Hodnoty
Objemová hmotnost ve vysušeném stavu (OHS)	627 kg/m ³
Objemová hm. vlhká ve zhuštěném stavu (OHV-z)	758 kg/m ³
Objemová hmotnost v max. nasyceném stavu (OHN)	1 275 kg/m ³
Maximální vodní kapacita (MVK)	30–55 objem %
Retence vody při MVK	5 l/cm výšky/m ²
Celkový objem vzduchových pórů	> 65 objem %
Vodivost	≤ 0,65 mS/cm
Propustnost	6–70 mm/min

4.2 Biochar

Na experimentální extenzivní zelené střeše se používá biochar, který se vyrábí pomocí zplyňování ve společnosti ENERGO Zlatá Olešnice s. r. o. pod značkou NATURE CARBON. Společnost se nachází, v severní části České republiky.

Tento biochar má certifikaci ÚKZÚZ jako pomocná půdní látka. Tato certifikace znamená, že produkt byl ověřen a schválen nezávislou státní organizací – Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZ) v České republice. Biochar vyrobený ve Zlaté Olešnici splňuje přísné bezpečnostní a kvalitativní standardy, a je tedy považován za bezpečný a vhodný pro použití.

Matušík et al. 2022 popisuje ve své práci způsob získání biocharu metodou zplyňování ve městě Zlatá Olešnice. Používá se k tomu patentované zařízení pro vícestupňové zplyňování uhlíkového paliva s českým patentem № 306239. Technologie se skládá z několika fází, a to včetně sušení, pyrolýzy, oxidace a redukce. Ve Zlaté Olešnici se používají jako primární biomasa dřevěné palety. Pro přípravu surovin na další fáze procesu se primární biomasa rozemele na malé dřevní štěpky. První fází je sušení připraveného materiálu do 10 % vlhkosti a oddělení železných hřebíků pomocí magnetů. Dále se vyčištěná a vysušená biomasa dostane do dvoustupňového zařízení s technologií dvojitého spalování. Druhou fází je pyrolýza v horní části gazifikátoru při teplotě 500–600 stupňů. Ve třetí fázi (při zahřátí na 1 000 stupňů) dochází k částečné oxidaci, těkavé látky se rozkládají na plyny. Produkty těchto procesů jsou biochar a syntetický plyn. Poslední fází procesu je chlazení syntetického plynu, odstranění zbývajících malých částic a spalování v kogenerační jednotce za účelem získání energie.

Biochar vyrobený ve Zlaté Olešnici je velmi kvalitní, což potvrzují jeho parametry: vysoký obsah uhlíku a velmi nízké poměry O/C a H/C, nízký obsah kovů.

Během experimentu bylo také vybráno pět nezávislých vzorků biocharu, které byly analyzovány v různých laboratořích České zemědělské univerzity v Praze.

Výsledky byly zprůměrovány do tabulky číslo 5:

Tab. 5: Průměrné hodnoty vlastností biocharu vyrobeného ve Zlaté Olešnici

Parametry biocharu	Hodnoty
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	394,6
Pórovitost [-]	0,80
Specifický povrch [m ² g ⁻¹]	517,4
pH	11,0
Vodivost [μS.cm ⁻¹]	1 295
Organický uhlík [% wt.]	86,2
Dusík [mg.kg ⁻¹]	2 942
Fosfor [mg.kg ⁻¹]	862
Součet PAH 12 [mg.kg ⁻¹]	< 0,5
As [mg.kg ⁻¹]	< 2,1
Cr [mg.kg ⁻¹]	< 9,6
Hg [mg.kg ⁻¹]	0,009
Pb [mg.kg ⁻¹]	< 6,6

Jedním z ukazatelů vysoké kvality biocharu je množství obsaženého uhlíku (více než 70 %). V biocharu použitém na experimentální extenzivní zelené střeše je obsah uhlíku 86 %. Dalším parametrem, který určuje kvalitu biocharu, je velká plocha povrchu a pórovitá struktura. Byla však zjištěna vysoká hodnota pH, což je neobvyklé, protože většina biocharu má pH od neutrálního po mírně kyselé. Biochar s pH 11 je považován za vysoce zásaditý. To znamená, že má vysokou koncentraci hydroxidových iontů (OH⁻) a nízkou koncentraci vodíkových iontů (H⁺). Aplikace takového biocharu může mít řadu výhod: zvýšení pH půdy a dostupnost živin, snížení toxicity kovů. Ale na druhou stranu může přispět k vyplavování živin (Weber et Quicker 2018).

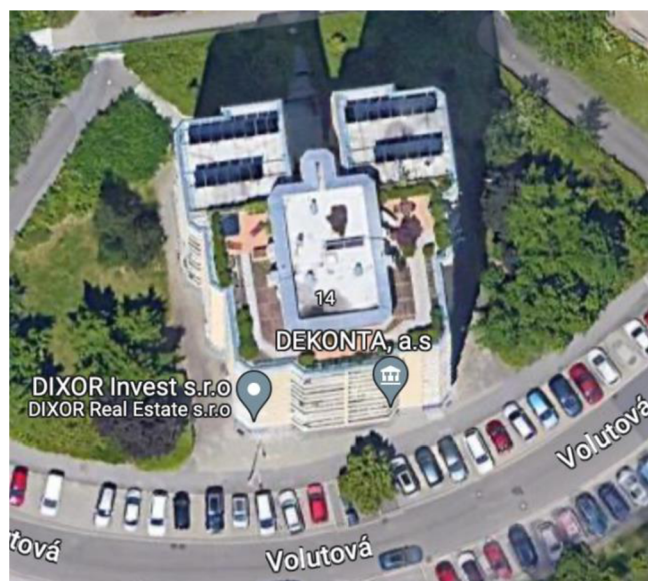
4.3 Experiment na extenzivní zelené střeše

4.3.1 Skladba experimentální střechy

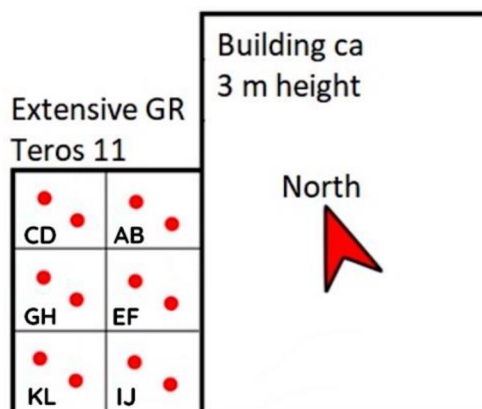
Experimentální extenzivní zelená střecha se nachází na střeše 12patrového domu ve výšce 315 metrů nad mořem. Zvláštností okolních podmínek je polokontinentální klima, silný vítr kvůli otevřené střešní ploše a převládající stín. Experimentální záhon se skládá ze šesti oddělených polí. Tato pole jsou oddělena hliníkovými deskami. Každé pole má rozměr 1,35×1,70 m. Skladba vrstev záhonů je následující: PVC folie,

drenáž, filtrační geotextilie, substrát. PVC folie zabraňuje prorůstání kořenů do střechy. Tři pole jsou naplněna komerčním substrátem SSE, další tři pole pak komerčním substrátem SSE-B s 5 % přídavkem biocharu. Byla zvolena skladba šesti polí šachovnicovitě uspořádaných (biochar + kontrola) pro eliminaci chyby měření. Pro další srovnání retenčních vlastností komerčního substrátu s aplikovaným biocharem a bez jeho přidání na každém ze šesti polí se používají dva senzory Teros 11 je určený pro měření tepla a množství vody v substrátu experimentální extenzivní zelené střechy. Každý ze senzorů má své vlastní označení: první pole – AB, druhé pole – CD, třetí pole – EF, čtvrté pole – GH, páté pole – IJ a šesté pole – KL. Protože každý senzor měří dva parametry, data z jednoho pole vypadají takto: A–teplota, A–vlhkost, B–teplota, B–vlhkost. Pole se substrátem SSE-B jsou CD, EF, KL. Zároveň se na experimentální střeše nachází meteorologická stanice Atmos, která zaznamenává srážky každých 15 minut. Principy fungování senzorů Teros 11 a meteorologické stanice Atmos jsou popsány dále v kapitole 4.4.

Obr. 13: Pohled na experimentální zelenou střechu z letecké mapy



Obr. 14: Schéma extenzivní experimentální střechy (Červené body označují umístění snímačů Teros 11, které se nacházejí v každém poli experimentální střechy.)



Obr. 15: Experimentální pole, která jsou rozdělena na 6 částí



4.3.2 Vegetace experimentální zelené střechy

Na experimentální extenzivní zelené střeše byla v květnu 2021 vysazena vegetace, jež byla zvolena z hlediska extenzivního typu střechy, hloubky a vlastností substrátu a klimatických podmínek. Celkem bylo na šesti částech experimentální střechy vysazeno devět druhů rostlin.

Tab. 6: Druhy rostlin vysazené na experimentální střeše (BioLib ©2021)

Název pole	Substrát	Druh rostliny (vědecký název)	Druh rostliny (český název)
AB	SSE	Hieracium pilosella, Veronica spicata, Achillea millefolium, Desphampsia caespitosa, Aquilegia vulgaris	Jestřábník chlupáček, Rozrazil klasnatý, Řebříček obecný, Metlice trsnatá, Orlíček obecný
GH	SSE	Arabis caucasica, Bupthalmum salicifolium, Pulsatilla vulgaris, Briza media	Huseník kavkazský, Volovec vrbolistý, Koniklec německý, Třeslice prostřední
IJ	SSE	Hieracium pilosella, Veronica spicata, Achillea millefolium, Desphampsia caespitosa, Aquilegia vulgaris	Jestřábník chlupáček, Rozrazil klasnatý, Řebříček obecný, Metlice trsnatá, Orlíček obecný
CD	SSE-B	Arabis caucasica, Bupthalmum salicifolium, Pulsatilla vulgaris, Briza media	Huseník kavkazský, Volovec vrbolistý, Koniklec německý, Třeslice prostřední
EF	SSE-B	Hieracium pilosella, Veronica spicata, Achillea millefolium, Desphampsia caespitosa, Aquilegia vulgaris	Jestřábník chlupáček, Rozrazil klasnatý, Řebříček obecný, Metlice trsnatá, Orlíček obecný
KL	SSE-B	Hieracium pilosella, Veronica spicata, chillea millefolium, Desphampsia caespitosa, Aquilegia vulgaris	Jestřábník chlupáček, Rozrazil klasnatý, Řebříček obecný, Metlice trsnatá, Orlíček obecný

4.4 Experimentální měření

4.4.1 Měření půdní vlhkosti

K měření půdní vlhkosti na zelené střeše se používá přesný inovativní senzor Teros 11 od výrobce METER Group. Jeho hlavní funkce je měření vlhkosti a teploty půdy. Teros 11 byl preferován nejen díky svým spolehlivým schopnostem měření, ale také své velikosti 9,4 cm, což umožňuje jeho použití v nehlubokých substrátech.

Na experimentální zelené střeše jsou v každém ze šesti oddílů nainstalovány dva senzory Teros 11. Tento počet senzorů pomáhá minimalizovat chybu. Jsou umístěny vodorovně (obrázek 15), protože hloubka substrátu je pouze 9 cm. Teros 11 se hodí nejen pro zeminu, ale i pro různé druhy substrátů a doplňků, a to včetně biocharu. Všechna data z tohoto senzoru jsou zaznamenána každých 15 minut do dataloggeru.

Teros 11 určuje objem vlhkosti v půdě (Volumetric Water Content – VWC) pomocí kapacitní technologie měřením dielektrické permeability půdy. Skládá se z hlavní části (sondy) a tří elektrod. Když je sonda vložena do půdy, Teros 11 vysílá elektrický impuls nízké energie do půdy. Molekuly vody v půdě vytvoří dielektrickou konstantu, která ovlivňuje kapacitu senzoru. Voda totiž lépe vede elektřinu. Čím rychleji impuls projde půdou, tím větší v ní bude množství vlhkosti. Senzor poté změří změnu kapacity a převede ji na indikaci VWC. Filtrace minimalizuje možné chyby v důsledku slanosti nebo textury půdy.

Teros 11 také obsahuje teplotní senzor pro korekci vlivu teploty na dielektrickou propustnost půdy. Je schopen odolat drsným podmínkám prostředí a může pracovat při teplotách od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (METER Group 2019).

Obr. 16: Čidlo Teros 11 (METER Group 2019)



Obr. 17: Umístění senzoru Teros 11 v substrátu experimentální střechy



- Metoda VWC – volumetric water content

Využitelnou vodní kapacitu (VVK – je popsána v kapitole 1.3) lze vyjádřit jako objemový obsah vlhkosti (VWC – Volumetric Water Content).

Objemový obsah vlhkosti je objem vody na jednotku objemu suché půdy (Easton, Z. M., 2021). Tento parametr se také nemusí vztahovat pouze na půdu, ale na jakékoli jiné porézní prostředí. Vyjadřuje se v procentech nebo zlomcích z celkového objemu půdy nebo jiného prostředí. Například $VWC = 0,15$ nebo 15 % znamená, že 15 % z celkového objemu půdy tvoří voda. Objemový obsah vlhkosti lze změřit několika metodami, ale jednou z nejčastějších je time-domain reflectometer (TDR – metoda časové reflektometrie). Také existují metody související s kapacitními senzory a neutronovými sondami. Tyto metody fungují pomocí měření dielektrických vlastností půdy, které se mění se změnou obsahu vlhkosti.

Vzorec pro výpočet objemového obsahu vlhkosti (VWC) je:

$$VWC = (V_w/V_t) \times 100 \%$$

V_w = objem vlhkosti v půdě nebo jiném porézním médiu (jednotky: cm^3 nebo mL)

V_t = celkový objem půdy nebo jiného porézního média (jednotky: cm^3 nebo mL)

4.4.2 Meření atmosférických parametrů

Atmos 41 je univerzální meteorologická stanice, která poskytuje vysoce přesná data o atmosférických parametru v reálném čase. Široký rozsah měřených dat zahrnuje: sluneční záření, atmosférické srážky, teplotu vzduchu, barometrický tlak, rychlost a směr větru atd. Používá mnoho senzorů, které jsou všechny v jedné hlavní jednotce. Ze senzorů uvnitř stanice je vysoce přesný teploměr, kapacitní senzor pro měření vlhkosti, barometrický tlakový senzor, zvukový anemometr pro měření rychlosti a směru větru. Výhodou této meteorologické stanice je malá pravděpodobnost chyby. Chyba měření atmosférických srážek je například 5 % měření od 0 do 50 mm/h, teploty vzduchu je $\pm 0,6$ °C, barometrického tlaku je $\pm 0,1$ kPa od -10 do 50 °C a $\pm 0,5$ kPa od -40 do 60 °C. Dalším předpokladem je, že meteorologická stanice Atmos 41 je vytvořena tak, aby vydržela drsné povětrnostní podmínky, jako jsou extrémní teploty, silný vítr a přívalový déšť. To jsou důležité vlastnosti, protože tak meteorologická stanice odolá silnému větru na otevřené střeše. Další vlastnost je, že data shromážděná senzory jsou bezdrátově přenášena na cloudovou platformu. Data mohou být přenášena přes satelitní, mobilní nebo Wi-Fi síť (METER Group 2019).

Obr. 18: Meteorologická stanice Atmos 41 (METER Group 2019)



4.4.3 Zpracování naměřených dat

Na experimentální extenzivní střeše se měří několik hlavních parametrů spojených s retenčními schopnostmi substrátu: obsah vlhkosti v substrátu, jeho teplota a úhrn srážek. Obsah vlhkosti a teplota substrátu se měří pomocí senzorů Teros 11 a data se

ukládají do dataloggeru každých 15 minut. Existují časové mezery, kdy senzory neprovádějí a nezaznamenávají měření, protože systém musí být přeprogramován, aby fungoval ještě přesněji. Na naší experimentální zelené střeše, kde dochází k pozorování vlastností substrátu s biocharem, nejsou k dispozici žádná data z července 2022, protože datalogger byl tehdy přeprogramován. Na experimentální střeše v Praze-Stodůlky začal záznam dat 1. 6. 2021 a pokračuje doposud. Obsah vlhkosti v substrátech je měřen a zaznamenáván do dataloggeru jako VWC (m^3/m^3). Další úprava a analýza dat probíhá prostřednictvím MS Excel. Pro snadnou práci s daty jsou přepočítána na denní průměry a procenta. Dále se zpracovávají grafy, které zobrazují změny teploty a VWC v substrátech s aplikovaným biocharem a bez biocharu a závislost na srážkách.

5. Výsledky

Na grafu 1 je zobrazen první měsíc experimentu – červen, 2021. Byl vybrán časový interval 02.–VI-28. červnaVI, protože ve stejných dnech byla provedena měření i v roce 2022 (graf 2). Při porovnání získaných dat v jednom intervalu za dva roky lze sledovat změny ve vlastnostech biocharu v substrátu zelené střechy.

Graf 1 i graf 2 zobrazují průměrnou denní objemovou vlhkost (VWC) vždy pro tři plochy v substrátech experimentálních extenzivních polí s přidáním biocharem (SSE-B) a bez biocharu (SSE) a denní úhrn srážek (Atmos).

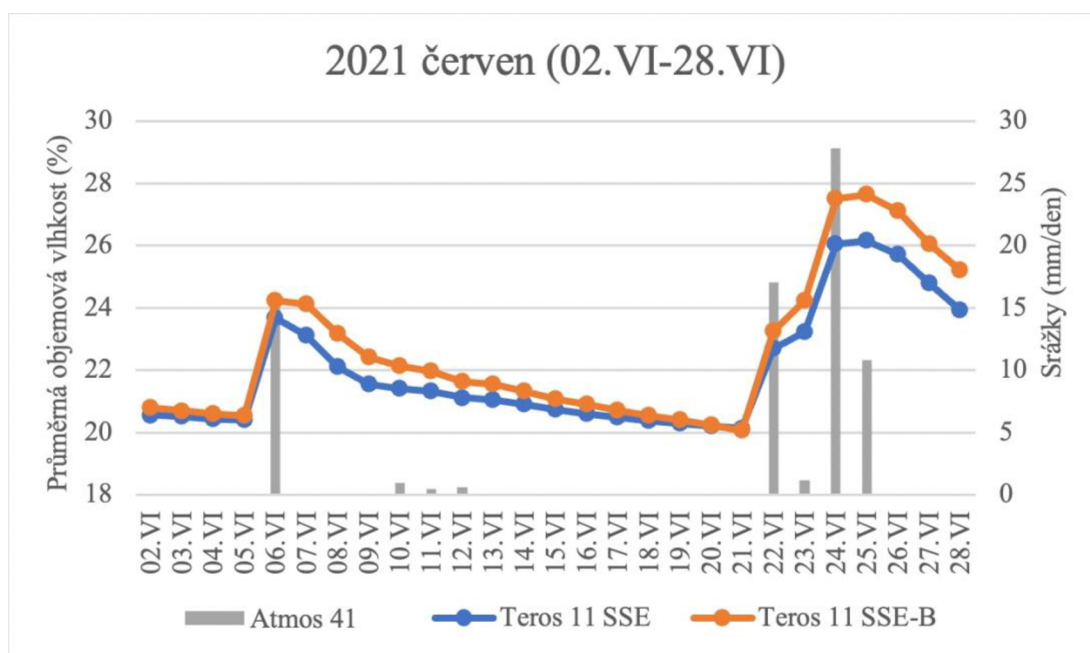
Na grafu 1 je vidět, že před prvními srážkami mají oba substráty téměř stejnou vlhkost. První srážky měření byly zaznamenány 6. června 2021, a to v množství 16,16 mm/den. V tento den hodnoty vlhkosti výrazně stouply u obou druhů substrátů. Substrát v polích **s biocharem** (SSE-B; oranžová křivka) měl po srážkách nejvyšší objemovou vlhkost 24,25 % oproti substrátu v polích **bez biocharu** (SSE; modrá křivka), který měl nejvyšší vlhkost 23,69 %. Je však důležité poznamenat, že z naměřených dat vyplývá, že substrát s biocharem má stále vyšší obsah vlhkosti než substrát bez přidaného biocharu. Slabé srážky byly zaznamenány 10. až 12. června 2021. Křivka substrátu v polích **s biocharem** nadále zůstávala nad křivkou substrátu v polích **bez biocharu**. V důsledku nedostatku srážek po zbytek června klesala vlhkost v obou substrátech, přičemž v případě ošetření biocharem byl tento pokles mírnější. V posledních dnech měsíce června došlo k intenzivním srážkám, v jejichž důsledku se zvýšila půdní vlhkost, kdy opět varianta SEE-B vykazovala významně vyšší hodnoty VWC.

Graf 2 zobrazuje červen 2022. Na rozdíl od předchozího roku bylo v roce 2022 zaznamenáno více dní se srážkami. Maximální množství srážek bylo 7. června, a to v množství 8,06 mm/den. Za zmínku také stojí, že 17. června nebyla zaznamenána hodnota objemové vlhkosti a množství srážek. Důvody byly aktualizace a kontrola zařízení. Na grafu 2 je vidět, že zpočátku měsíce substrát bez biocharu (SSE; modrá křivka) měl vyšší procenta objemové vlhkosti oproti substrátu s biocharem (SSE-B; oranžová křivka). Při prvních srážkách, které byly 4. června, se hodnoty vlhkosti substrátů s biocharem a bez biocharu srovnaly. Nárůst procenta objemové vlhkosti substrátu v polích s biocharem byl 0,6 %, zatímco u substrátu v polích bez biocharu tento nárůst činil jenom 0,2 %. Při srážkách 6. a 7. června jsou procenta vlhkosti

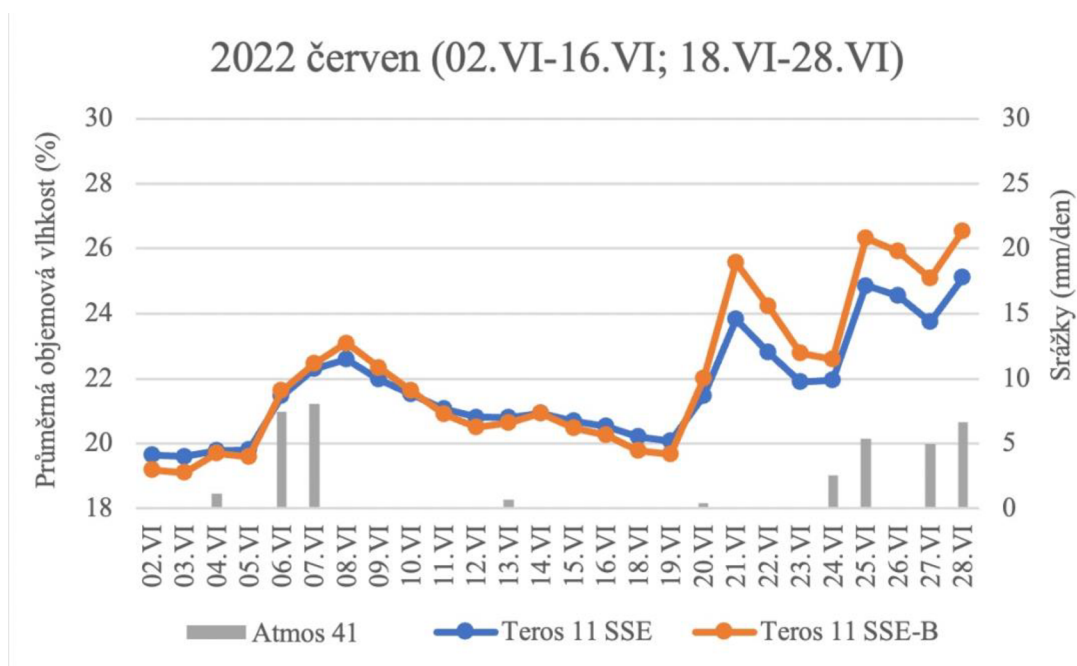
substrátu v polích s **biocharem** o něco vyšší ve srovnání se substrátem v polích **bez biocharu**. Na konci měsíce byl zaznamenán markantní růst hodnot objemové vlhkosti v obou substrátech. Nicméně křivka substrátu v polích s **biocharem** zůstávala nad křivkou substrátu v polích **bez biocharu**. Dne 21. června byl zaznamenán největší rozdíl mezi hodnotami vlhkosti substrátů (1,75 %) za tento měsíc.

V porovnání s červnem 2021 byla křivka substrátu v polích s **biocharem** v červnu 2022 méně stabilní. Někdy byla křivka v polích bez biocharu vyšší (během období bez srážek). Po srážkách byla téměř vždy objemová vlhkost v substrátu v polích s biocharem vyšší než v substrátu v polích bez biocharu.

Graf 1: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhm srážek (mm/den) – červen 2021



Graf 2: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhrn srážek (mm/den) – červen 2022



Grafy 3 a 4 ukazují průměrnou denní objemovou vlhkost (VWC) vždy pro tři plochy v substrátech experimentálních extenzivních polí s přidáním biocharu (SSE-B) a bez biocharu (SSE) a denní úhrn srážek (Atmos) v srpnu 2021 i srpnu 2022. Na grafu 4 je vidět, že data z 20. srpna 2022 nejsou k dispozici. Je to kvůli tomu, že zařízení vyžadovala aktualizaci a kontrolu pro přesnější další práci.

Graf 3 ukazuje, že první vydatné srážky v srpnu 2021 byly zaznamenány 1. čísle a činily 20,05 mm/den. Po prvních srážkách se v obou substrátech zvýšila procenta objemové vlhkosti: křivka substrátu v polích **s biocharem** (SSE-B; oranžová křivka) dosáhla 25,9 %, zatímco křivka substrátu v polích **bez biocharu** (SSE; modrá křivka) dosáhla 24,76 %. Dále stoupání a poklesy hodnot vlhkosti v obou substrátech šly paralelně, ale křivka substrátu s biocharem vždy zůstávala vyšší. V důsledku nedostatku srážek po zbytek srpna klesala procenta vlhkosti v obou substrátech, přičemž v případě substrátu s biocharem byl tento pokles mírnější. Graf 3 ukazuje, že po celou dobu byla křivka substrátu v polích **s biocharem** trvale vyšší než křivka substrátu v polích **bez biocharu**, což znamená, že substrát s přídavkem biocharu měl vyšší hodnoty vlhkosti než neupravený substrát. Ve dnech 5. a 7. srpna byl zaznamenán největší procentuální rozdíl mezi vlhkostí substrátů (1,43 %).

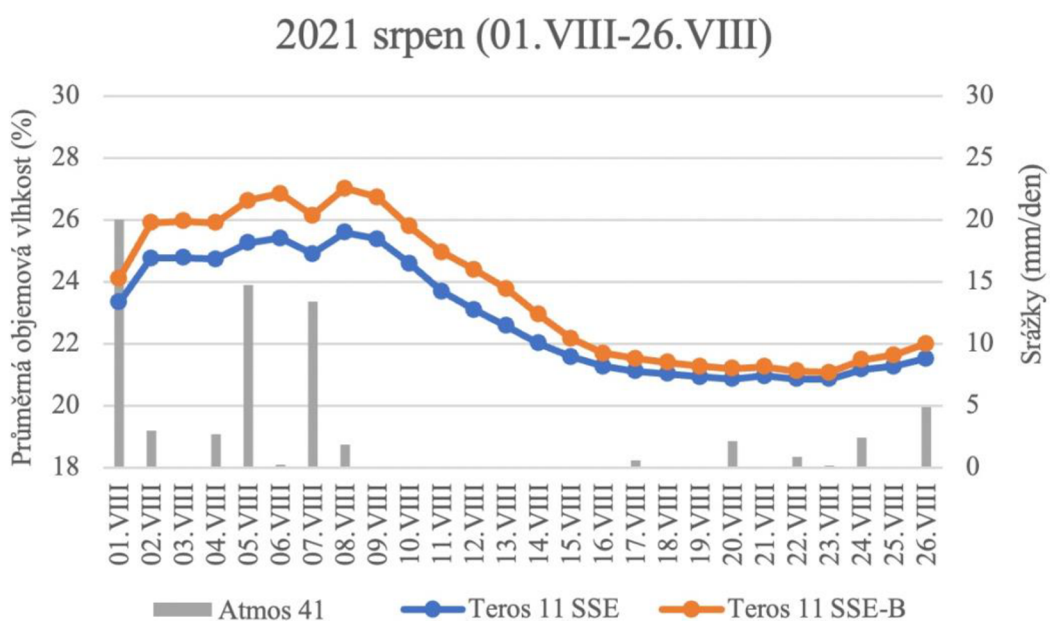
Graf 4 na rozdíl od předchozího poukazuje, že v roce 2022 substrát v polích **s biocharem** (SSE-B; oranžová křivka) neměl procenta VWC trvale větší než substrát v polích **bez biocharu** (SSE; modrá křivka). Ve dnech 1. až 5. srpna hodnoty objemové vlhkosti klesly u obou substrátů kvůli nedostatku srážek. Patrný nárůst procenta objemové vlhkosti v obou substrátech byl zaznamenán 6. srpna. To bylo způsobeno srážkami, které činily 4,53 mm/den. To jsou téměř jediné intenzivní srážky, které lze tento měsíc pozorovat, s výjimkou předpokládaných srážek 20. srpna. V tento den měl substrát v polích s biocharem vyšší procento VWC (24,51 %) než substrát v polích bez biocharu (23,24 %). V polovině srpna klesala procenta vlhkosti v obou substrátech vlivem nedostatku srážek. Substrát v polích bez biocharu měl tento pokles mírnější. Tento výsledek byl opačný v srpnu 2021, kdy mírnější pokles měl substrát s přidavkem biocharu. Data ze 20. srpna nejsou k dispozici. Vzhledem k tomu, že 21. srpna graf 4 zobrazuje prudký nárůst hodnot objemové vlhkosti, lze předpokládat, že 20. srpna byly intenzivní srážky, díky nimž procenta VWC vzrostla. Substrát upravený biocharem měl 21. srpna vyšší hodnoty objemové vlhkosti (25,6 %) ve srovnání se substrátem v polích bez biocharu (23,92 %). Na konci měsíce křivka substrátu v polích s biocharem byla stále vyšší než křivka substrátu bez přidavku biocharu.

Při porovnání grafů 3 a 4 se dá říci, že substrát s přidavkem biocharu prokázal vyšší stabilitu v srpnu 2021 než v srpnu 2022. To je vidět, protože procento VWC v srpnu roku 2021 je vždy vyšší u substrátu v polích **s biocharem** než u substrátu v polích **bez biocharu**. V srpnu 2022 už tomu tak není.

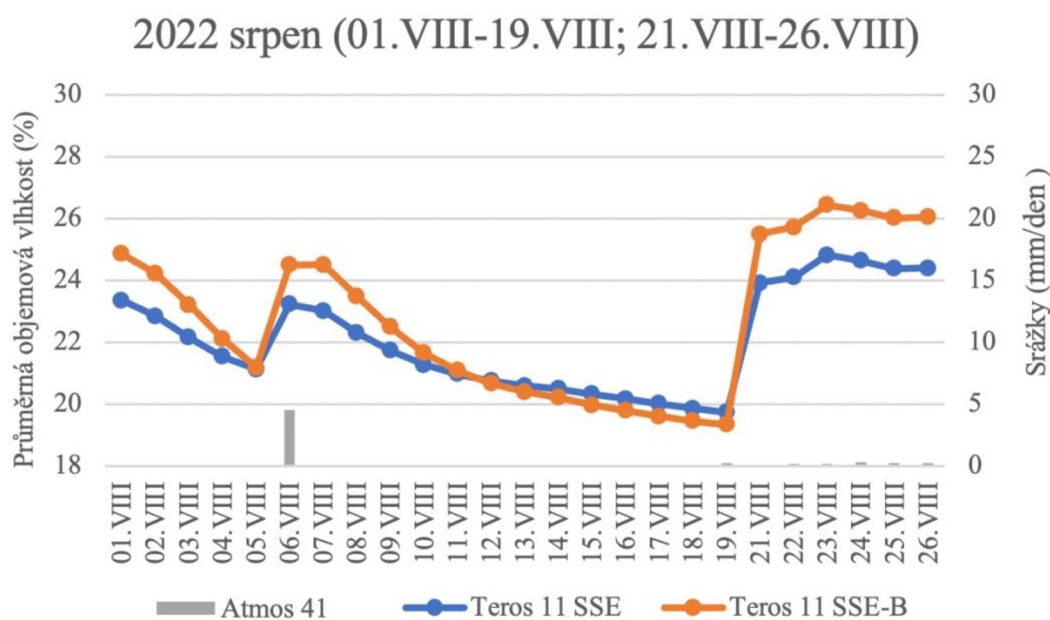
Podobnou stálost lze vidět při porovnávání grafů za rok 2021 (grafy 1 a 2) a rok 2022 (grafy 3 a 4). V roce 2021, na rozdíl od roku 2022, byly hodnoty objemové vlhkosti u křivky substrátu v polích **s biocharem** konstantně vyšší než u křivky substrátu v polích **bez biocharu**.

Na grafech 1, 2, 3 a 4 je vidět, že po srážkách začaly substráty vysychat, ale substrát modifikovaný biocharem měl stále větší množství vlhkosti než kontrolní substrát bez aplikace biocharu. Po delší době (podle měření sedm až 10 dní) se množství vlhkosti v obou variantách substrátu vyrovná a dále vysychají stejně.

Graf 3: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhm srážek (mm/den) – srpen 2021



Graf 4: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhm srážek (mm/den) – srpen 2022



6. Diskuze

Bakalářská práce se zabývala ověřením funkčnosti aplikovaného biocharu v substrátu zelených střech. Výsledky experimentu na extenzivní zelené střeše jsou v souladu s hypotézou, že přidání biocharu do substrátu zelené střechy zvyšuje retenční schopnost tohoto substrátu. K podobným závěrům dospěli v předchozích studiích týkajících se hydraulických vlastností zelených střech při aplikaci biocharu i mnozí autoři (Kuoppamäki et al. 2016; Chen et al. 2018; Huang et al. 2020; Harada et al. 2020; Chen et al. 2021, Tan et Wang 2023).

Zároveň byly provedeny studie zkoumající závislost mezi srážkami, klimatickými podmínkami a schopností zelených střech k zadržování dešťové vody. Akther et al. 2018 tvrdí, že retenční schopnost zelené střechy závisí na klimatické zóně, ve které se střecha nachází. Čím je klima chladnější, tím menší je retenční efekt. V aridním klimatu byla míra zadržování dešťové vody v průměru 71,28 % až 78,10 %, a to na rozdíl od kontinentálního klimatu, kde průměr činil 56,04 % až 57,10 %. Je to z důvodu, že v sušším a teplejším klimatu dochází k rychlejší evaporaci ze substrátu. Zvláštností mírného klimatu je, že retence dešťové vody na zelených střechách je relativně vysoká při malých srážkách (podle množství a intenzity). Tento závěr je shodný s předpokladem Kuoppamäki et al. 2016, že efekt zadržování vody na zelených střechách se substrátem s přídavkem biocharu je ovlivněn převládajícími povětrnostními podmínkami. Náš experiment také potvrzuje závislost mezi množstvím a intenzitou srážek na retenční schopnosti substrátu. Procento VWC značně stoupl, když srážky přišly po dlouhém období sucha. Při dlouhotrvajících srážkách se zvýšená retenční schopnost substrátu neprojevila. Na druhou stranu se vliv biocharu na retenční schopnost substrátu více projevil během vzácných, ale intenzivních srážek. Největší rozdíl v procentu VWC v našem experimentu byl zaznamenán 21. června 2022 a byl roven 1,75 %. Průměrný rozdíl v procentu VWC u substrátu s modifikací biocharem a kontrolního substrátu při vydatných a krátkých srážkách byl 1,53 %. Z těchto výsledků lze jednoznačně usoudit pozitivní vliv aplikace biocharu na retenční schopnosti substrátu.

Chen et al. ve svých experimentech v letech 2018 a 2021 zkoumal vliv biocharu na fyzikální a chemické vlastnosti substrátu zelených střech a vliv biocharu na mikrobiální komunity. V obou studiích bylo použito pět druhů substrátu které

zahrnovaly přírodní půdu (PP) a směsi místní přírodní půdy a 5 %, 10 %, 15 % a 20 % kalového biocharu (5 % KB, 10 % KB, 15 % KB a 20 % KB). Hlavní parametry, které byly spojeny se zadržováním vody v substrátu a měřeny v těchto experimentech, byly suchá sypná hustota (bulk density – BD), pórovitost půdy (soil porosity – SP) a kapacita zadržování vody (water-holding capacity – WHC). Výsledky z roku 2018 ukazují, že maximální procento WHC měl substrát ze směsi přírodní půdy a 20 % kalového biocharu ($59,51 \pm 0,02$), zatímco minimální procento WHC měla přírodní půda bez přidaného biocharu ($44,23 \pm 0,12$). Také byla zaznamenána zákonitost, že čím více bylo přidáno biocharu do substrátu, tím vyšší bylo procento WHC tohoto substrátu. Dalším výsledkem bylo, že díky biocharu substrát lépe zadržoval vodu a živiny, měl větší pórovitost, což mělo pozitivní vliv na všechny studované mikrobiální komunity. Tyto výsledky potvrdil ve svém experiment Chen et al. v roce 2021. Maximální procento WHC bylo zaznamenáno u substrátu ze směsi přírodní půdy a 20 % kalového biocharu ($59,76 \pm 0,22$), zatímco minimální procento WHC měla přírodní půda bez přidaného biocharu ($43,56 \pm 0,17$). Zákonitost byla také potvrzena: čím větší množství biocharu bylo aplikováno, tím vyšší bylo procento WHC: $PP < 5 \% KB < 10 \% KB < 15 \% KB < 20 \% KB$. Výsledky týkající se vlivu na mikrobiální komunity ukázaly, že biochar má přímý vliv na zvýšení mikrobiální biomasy v půdě substrátu zelené střechy díky pórovitosti a zdrojům živin.

V našem experimentu bylo měřeno procento VWC na rozdíl od experimentů Chena. Shodnost mezi objemovým obsahem vlhkosti (VWC) a kapacitou zadržování vody (WHC) spočívá v tom, že oba parametry se používají k popisu obsahu vlhkosti v půdě nebo substrátu. Tyto parametry jsou ukazateli možnosti půdy nebo substrátu zadržovat vodu. Jejich rozdíl spočívá v tom, že VWC představuje množství vody v půdě nebo substrátu v daném čase, zatímco WHC představuje maximální množství vody, které půda nebo substrát pojme. Proto je VWC dynamický parametr, jež se v průběhu času mění, zatímco WHC je statický parametr, který je určen fyzikálními vlastnostmi půdy nebo substrátu.

I když v našem experimentu byl zohledněn jiný parametr, výsledky byly podobné a spočívaly v tom, že biochar má pozitivní vliv na retenční schopnost substrátu zelené střechy.

Tan et Wang 2023 zkoumal závislost velikosti částic biocharu a jeho množství na retenční schopnosti substrátu zelené střechy. Byl použit biochar získaný pyrolýzou

dřevěného odpadu o velikosti částic 0,25 mm and 1 mm. Dále byly částice smíchány s přirozenou půdou v různých proporcích hmotnostního vztahu: 0 %, 10 %, 20 %. Byly zkoumány 4 druhy substrátu: přirozená půda (PP), přirozená půda s 10 % přídavkem hrubého biocharu (B10H), přirozená půda s 20% přídavkem jemného biocharu (B20J), přirozená půda s 20% přídavkem hrubého biocharu (B20H). Výsledky ukázaly, že poměr pórovitosti byl následující: PP < B10H < B20H < B20J. Byl také zkoumán parametr WHC. Největší procento WHC měl substrát B20J ($39,45 \pm 0,26$), a to na rozdíl od substrátu PP, který měl nejmenší procento WHC ($23,68 \pm 0,78$). Je důležité poznamenat, že největší retence substrátů modifikovaných biocharem byla zaznamenána při srážkách nepřesahujících 10 mm. Tan et Wang 2023 dospěl k závěru, že substrát upravený biocharem má větší retenční schopnost než substrát z přirozené půdy. Tento závěr je shodný s výsledky našeho experimentu a potvrzuje možnost využití biocharu ke snížení odtoku dešťové vody ze zelených střech. Dalším výsledkem Tan et Wang 2023 bylo to, že nejlepší retenční schopnost má jemný biochar, a to díky menší velikosti svých částic. Náš experiment neměl srovnání velikosti částic biocharu a jejich vlivu na retenční schopnost, takže tento výsledek nelze zhodnotit.

Výsledky našeho experimentu ukázaly, že oba druhy substrátů po srážkách začínaly vysychat, ale substrát s aplikovaným biocharem měl stále větší množství vody. Množství vody v substrátech se vyrovnávalo v průměru za 7–10 dní po srážkách. To znamená, že biochar pomáhá zadržovat vodu v substrátu déle, díky čemuž snižuje potřebu zavlažování a podporuje růst rostlin. To je důležitá výhoda biocharu zejména v době sucha. Cao et al. 2014 získal podobné výsledky ve svém experimentu.

Cao et al. 2014 ve svém experimentu zkoumal vliv biocharu na retenční schopnost substrátu a zlepšení zásobování rostlin vodou. Byly použity dva druhy substrátu na bázi strusky. Vyznačovaly se přítomností organické biologické látky (± 20 % kokosových vláken). Cao et al. 2014 zkoumal účinky přidání jednoho typu biocharu ze zeleného odpadu (0 %, 10 %, 20 %, 30 % a 40 %) na dva substráty. Výsledky experimentu ukázaly, že přidání biocharu do substrátu zelené střechy výrazně zvýšilo počet dní před bodem vadnutí vegetace na rozdíl od modifikovaného substrátu. Zpoždění nástupu vadnutí bylo způsobeno zvýšením kapacity zadržování vody v půdě (WHC) a dostupností pro rostliny. Tato zjištění podporují vztah mezi pozitivním

vlivem biocharu na retenci substrátu zelené střechy a zlepšením zásobování rostlin vodou.

Huang et al. 2020 ve svém experimentu dospěl k závěru, že substráty s vegetací – půda s vegetací (**VP**), půda s vegetací modifikovaná biocharem (**VPB**) – mají vyšší rychlost infiltrace přes póry (hydraulickou vodivost) než holé substráty – s holou půdou (**HP**), s holou půdou a biocharem (**HPB**). Nicméně výsledky ukázaly, že nejvyšší procento VWC měl substrát **VPB** (67,1 %), o něco menší procento měl **HPB** (62,5 %), předposlední byl **HP** (48,8 %), poslední byl **VP** (42,5 %). V této studii ukázal půdní sloupec s vegetací modifikovaný biocharem nejvyšší schopnost substrátu zadržovat srážkovou vodu, což zdůrazňuje klíčovou roli biocharu jako nové technologie pro snížení odtoku dešťové vody. V našem experimentu jsme získali podobné výsledky. Při srážkách bylo procento VWC substrátu upraveného biocharem téměř vždy vyšší než kontrolního substrátu. Potvrdila se tedy hypotéza, že substrát s biocharem měl vyšší retenční schopnost.

Volder et Dvorak 2014 dospěl k opačnému závěru, když studoval vliv vegetace v substrátu zelené střechy na zadržování dešťové vody. V experimentu zkoumali čtyři druhy substrátů: substrát bez vegetace, substrát s *T. calycinum*, substrát s *D. cooperi* a substrát se *S. kamtschaticum*. Pro přesnější výsledky byla vytvořena tři pole pro každý ze čtyř druhů substrátů. Během jejich experimentu došlo k 15 srážkovým událostem, ale VWC bylo naměřeno pouze 7krát (kvůli problému se zařízením). Substrát bez vegetace měl VWC před srážkami vyšší (15,4 %) než substráty s extenzivní zelení (13,1 %). Důvodem bylo, že rostliny absorbovaly vodu ze substrátu. Vzhledem k tomu, že mezi substráty s vegetací nebyl žádný rozdíl v koeficientech VWC, byla data zprůměrovaná. Pole s extenzivní vegetací měla procento zadržování vody 82,5 %, a to na rozdíl od polí bez vegetace, která měla VWC 74,5 %. Pole s vegetací měla v průměru o 7,5 % vyšší retenční schopnost. Výsledky potvrdily opačnou hypotézu, že zelené střechy s extenzivní vegetací mají nižší rychlost infiltrace a zadržují více srážek než holý substrát. Proto byl v našem experimentu vybrán výzkum vlastností biocharu v substrátu extenzivní (s vegetací) zelené střechy. Díky tomu, že největší rozdíl v procentu VWC mezi extenzivním substrátem modifikovaným biocharem a kontrolním substrátem v našem experimentu byl 1,75 %, lze předpokládat, že biochar neměl významný vliv na retenční schopnosti extenzivní zeleně jako hnojivo.

Lze se však domnívat, že vegetace a biochar mohou mít dvojnásobný účinek v retenční schopnosti substrátu. K potvrzení této myšlenky je však potřeba další výzkum.

Vzhledem k tomu, že předpoklady Huang et al. 2020 a Volder et Dvorak 2014 ohledně rychlosti infiltrace se liší, lze dospět k závěru, že toto téma není dostatečně prozkoumáno a je zapotřebí dalších experimentů. V budoucích studiích by bylo zajímavé prozkoumat, co má větší vliv na infiltraci substrátu zelené střechy a zda na ni bude mít vliv biochar.

Při hodnocení výsledků Cao et al. 2014, Akther et al. 2018, Kuoppamäki et al. 2016, Huang et al. 2020, Volder et Dvorak 2014, Chen et al. 2018, Chen et al. 2021 a Tan et Wang 2023 lze konstatovat, že biochar má pozitivní vliv na retenční schopnost substrátu zelených střech. Je však důležité vzít v úvahu klimatické a povětrnostní podmínky umístění zelených střech pro zvolení nejvýhodnějšího hmotnostního poměru biocharu k substrátu. Nesprávná volba může způsobit zaplavení substrátu. Zároveň pro zvýšení retenčních schopností je lepší dát přednost zeleným střechám s extenzivní zelení než s holým substrátem, zároveň preferovat substrát s jemným biocharem.

Tyto výsledky jsou podobné výsledkům experimentu v této práci a podporují mou hypotézu, že biochar má pozitivní vliv na retenční schopnosti substrátu extenzivní zelené střechy. Biochar je řešením problému nadměrného odtoku dešťové vody do kanalizačních systémů, jeho vlastnosti však vyžadují další zkoumání.

7. Závěr

Na základě zpracovaných dat byla potvrzena původní hypotéza, že biochar má pozitivní vliv na retenční schopnost substrátu extenzivní zelené střechy. Výsledky ukázaly, že substrát modifikovaný biocharem měl při srážkách větší procento objemové vlhkosti než kontrolní komerční substrát. Biochar se nejlépe projevil při vzácných intenzivních srážkách. Výsledky výzkumu odpovídají předpokladům z dalších studií.

Dalším důležitým závěrem je, že když po srážkách začínaly substráty vysychat, měl substrát upravený biocharem stále vyšší objemovou vlhkost. To je jedna z klíčových výhod používání biocharu v substrátu zelených střech díky zvýšení retence a zlepšení zásobování rostlin vodou.

Kromě vlivu biocharu na retenční schopnost substrátu zelených střech mnoho studií dospělo k závěru, že biochar snižuje objemovou hmotnost substrátu, zvyšuje pórovitost, což vytváří lepší podmínky a stanoviště pro mikroorganismy, zabraňuje vyplavování živin a je doplňkovým zdrojem vody a živin pro rostliny, dále snižuje teplotu střechy, což je výhodou v boji proti fenoménu tepelných ostrovů. Biochar je stabilní forma uhlíku, která zůstává v půdě po staletí. To je obrovská ekologická výhoda tohoto produktu. Dalším významným přínosem je, že primární biomasa biocharu může být získána ze širokého spektra organického odpadu, což hraje důležitou roli pro recyklaci. Tyto vlastnosti ukazují výhodnost použití biocharu k řešení mnoha problémů.

Stále je však potřeba zkoumat biochar v různých klimatických podmínkách pro lepší pochopení jeho vlastností.

Tento experiment je jedním z potvrzení potenciálu biocharu při řešení problémů s nadměrným odtokem dešťové vody ze střech. Podobné studie pomáhají pochopit přesné závislosti mezi retencí vody v substrátu s biocharem.

8. Seznam použité literatury

1. Akther M., He J., Chu A., Huang J., & Van Duin B., 2018: A review of green roof applications for managing urban stormwater in different climatic zones. *Sustainability*, 10 (8), 2864.
2. Baker A. J., & Brooks R., 1989: Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1 (2), 81-126.
3. Beck D. A., Johnson G. R., & Spolek G. A., 2011: Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental pollution*, 159 (8-9), 2111-2118.
4. Bianchini F., & Hewage K., 2012: How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and environment*, 48, 57-65.
5. Blanco-Canqui H., 2019: Biochar and water quality. *Journal of Environmental Quality*, 48 (1), 2-15.
6. Brewer C. E., & Brown R. C., 2012: 5.18 – Biochar. *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, Oxford, 357-384.
7. Brooks H. A., 1999: *Le Corbusier's Formative Years: Charles-Edouard Jeanneret at La Chaux-de-Fonds*. University of Chicago Press, Chicago & London, 514 s.
8. Cao C. T., Farrell C., Kristiansen P. E., & Rayner J. P., 2014: Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71, 368-374.
9. Chen H., Ma J., Wei J., Gong X., Yu X., Guo H., & Zhao Y., 2018: Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of the total Environment*, 635, 333-342.
10. Chen H., Du X., Lai M., Nazhafati M., Li C., & Qi W., 2021: Biochar improves sustainability of green roofs via regulate of soil microbial communities. *Agriculture*, 11 (7), 620.
11. Čermáková B., 2009: *Ozeleněné střechy*. Grada Publishing as., Praha, 246 s.
12. Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., & Zheng, B., 2016: Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36, 1-18.
13. Dunnett N., Kircher W., & Kingsbury N., 2004: Communicating naturalistic plantings: plans and specifications. In Dunnett N., Kircher W., & Kingsbury N.,

- (eds.): The dynamic landscape: design, ecology and management of naturalistic urban planting. Taylor & Francis, Sheffield. S. 348-367.
14. Easton Z. M., 2021: Soil and soil water relationships. Virginia Cooperative Extension, 2-7.
 15. Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., & Zech W., 2001: The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88, 37-41.
 16. Güneralp B., McDonald R. I., Fragkias M., Goodness J., Marcotullio P. J., & Seto K. C., 2013: Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment. Springer Dordrecht Heidelberg, New York & London, 755 s.
 17. Hameed B. H., & El-Khaiary M. I., 2008: Kinetics and equilibrium studies of malachite green adsorption on rice straw-derived char. *Journal of Hazardous Materials*, 153 (1-2), 701-708.
 18. Harada Y., Whitlow T. H., Bassuk N. L., & Russell-Anelli J., 2020: Rooftop Farm Soils for Sustainable Water and Nitrogen Management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 123.
 19. Hilten R. N., Lawrence T. M., & Tollner E. W., 2008: Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of hydrology*, 358 (3-4), 288-293.
 20. Huang S., Garg A., Mei G., Huang D., Chandra R. B., & Sadasiv S. G., 2020: Experimental study on the hydrological performance of green roofs in the application of novel biochar. *Hydrological Processes*, 34 (23), 4512-4525.
 21. Hussain R., Bordoloi S., Gupta P., Garg A., Ravi K., Sreedeeep S., & Sahoo L., 2020: Effect of biochar type on infiltration, water retention and desiccation crack potential of a silty sand. *Biochar*, 2, 465-478.
 22. Kavka B., & Šindelářová J., 1978: Funkce zelene v životním prostředí. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 235 s.
 23. Klasson K. T., Ledbetter C. A., Uchimiya M., & Lima I. M., 2013: Activated biochar removes 100 % dibromochloropropane from field well water. *Environmental chemistry letters*, 11, 271-275.
 24. Kohut M., Rožnovský J., & Chuchma F., 2010: Dlouhodobá zásoba využitelné půdní vody a její variabilita na území České republiky. *Voda v krajině*, 31, 35-46.
 25. Kotásková P., & Štěpán J.: ZELENÉ STŘECHY DŘEVOSTAVEB. Národní dřevařský klastr, 1-12.

26. Krull E., Lehmann J., Skjemstad J., Baldock J., & Spouncer L., 2008: The global extent of black cin soils: is it everywhere?. *Grasslands: ecology, management and restoration*, 13.
27. Kuoppamäki K., Hagner M., Lehvävirta S., & Setälä H., 2016: Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. *Ecological Engineering*, 88, 1-9.
28. Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., & Xu X., 2009: Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (2), 210-219.
29. Köhler M., & Poll P. H., 2010: Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecological Engineering*, 36 (5), 722-729.
30. Lundholm J. T., 2006: Green roofs and facades: a habitat template approach. *Urban habitats*, 4 (1), 87-101.
31. Matuščík J., Pohořelý M., & Kočí V., 2022: Is application of biochar to soil really carbon negative? The effect of methodological decisions in Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, 807, 151058.
32. METER Group, 2019: TEROS 11/12 manual. METER Group AG, München, 30 s.
33. Nagase A., Yamada Y., Aoki T., & Nomura M., 2018: Developing biodiverse green roofs for Japan: Arthropod and colonizer plant diversity on Harappa and Biotope roofs. *Urban Nat*, 1, 16-38.
34. Niu Y., Lv Y., Lei Y., Liu S., Liang Y., & Wang D., 2019: Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109395.
35. Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., ... & Rowe B., 2007: Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57 (10), 823-833.
36. Osmundson T., 1999: *Roof Gardens: History, Design, and Construction*. WW Norton & Company, New York.
37. O'Neill M., 2009: Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee: A Field Guide to Genetic Programming. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 10, 229-230.

38. Puig-Arnabat M., Bruno J. C., & Coronas A., 2010: Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14 (9), 2841-2851.
39. Razzaghi F., Obour P. B., & Arthur E., 2020: Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
40. Rowe D. B., 2011: Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental pollution*, 159 (8-9), 2100-2110.
41. Saiz S., Kennedy C., Brass B., Pressnail K., 2006: Comparative life cycle assessment of standard and green roof. *Environmental Science and Technology*, 40, 4312-4316.
42. Scharf B., & Zluwa I., 2017: Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy and buildings*, 151, 564-573.
43. Schiefler K., 2005: Zelené střechy, zelené fasády, zelená parkoviště. Svaz zakládání a údržby zeleně, 6-7.
44. Setter C., Silva F. T. M., Assis M. R., Ataíde C. H., Trugilho P. F., & Oliveira T. J. P., 2020: Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*, 261, 116420.
45. Shackley S., Ibarrola Esteinou R., Hopkins D., & Hammond J., 2014: Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0. British Biochar Foundation, Edinburgh, 55 s.
46. Simpson, 1999: A reinterpretation of the great pit in Hofstathir Iceland. *Geoarcheology: An International Journal*, 14 (6), 511-530.
47. Skjemstad J. O., Reicosky D. C., Wilts A. R., & McGowan J. A. 2002: Charcoal carbon in US agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (4), 1249-1255.
48. Strezov V., Patterson M., Zymła V., Fisher K., Evans T. J., & Nelson P. F., 2007: Fundamental aspects of biomass carbonisation. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 79 (1-2), 91-100.
49. Šír M., Tesař M., Lichner L., & Syrovátka O., 2003: Klimatická změna a transpirace rostlin. In Patera A., Váška J., Jakubíková A., (eds.): Workshop. Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Praha. S. 151-156.
50. Tan K., & Wang J., 2023: Substrate modified with biochar improves the hydrothermal properties of green roofs. *Environmental Research*, 216, 114405.

51. Volder A., & Dvorak B., 2014: Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustainable Cities and Society*, 10, 59-64.
52. Vreugdenhil B., Kroon P., & Leiser S., 2015: Complying With The EPA Clean Power Plan—A Techno-Economical Overview.
53. Wang D., Jiang P., Zhang H., & Yuan W., 2020: Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *Science of the Total Environment*, 723, 137775.
54. Weber K., & Quicker P., 2018: Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.
55. Yang J., Yu Q., & Gong P., 2008: Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric environment*, 42 (31), 7266-7273.
56. Yang Y., Sun K., Han L., Jin J., Sun H., Yang Y., & Xing B., 2018: Effect of minerals on the stability of biochar. *Chemosphere*, 204, 310-317.
57. Zhang C., Zeng G., Huang D., Lai C., Chen M., Cheng M., & Wang R., 2019: Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. *Chemical Engineering Journal*, 373, 902-922.

Internetové zdroje:

1. Šimečková J., Večeřová I., 2010: Zelené střechy – naděje pro budoucnost. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleňe (online) [cit. 2023.01.02] dostupné z <http://www.zelenestrechy.info/UserFiles/File/szuz_indd.pdf>.
2. BB COM s.r.o., 2022: střešní substrát extenzivní – SSE (online) [cit. 2023.01.02], dostupné z: <<https://www.bbcom.cz/pro-stresni-zahrady-extenzivni-sse?search=substrát%20sse%20>>.

Zdroje obrázků:

1. Obr. 1: Visuté zahrady Semiramidiny (Visuté zahrady babylonské) (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z < <https://www.worldhistory.org/image/77/hanging-gardens-of-babylon/>>.
2. Obr. 2: Tradiční zelené střechy na Islandu (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z < https://en.wikipedia.org/wiki/Sod_house>.
3. Obr. 3: Moderní extenzivní zelená střecha v Berlíně-Kreuzbergu (Köhler et Poll 2010).
4. Obr. 4: Biotopní zelená střecha, Chiba University, 10. července 2015 (Nagase et al. 2018).
5. Obr. 5: Extenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z <<https://www.greenville.cz/usporna-strecha.html>>.
6. Obr. 6: Intenzivní jednoduchá zelená střecha; Green Ville, Brno, Česko (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z <https://www.greenville.cz/polointenzivni_strecha.html>.
7. Obr. 7: Intenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z <<https://www.greenville.cz/stresni-zahrada.html>>.
8. Obr. 8: Příklad skladby vrstev zelené střechy (online) [cit. 2023.03.03], dostupné z <https://www.izolace-info.cz/technicke-informace/zatepleni-strechy/22987-zelene-strechy-atraktivni-a-moderni-prvek-architektury-a.html#ZAeNnC_5YdU>.
9. Obr. 9: Terra Preta (vlevo) a Oxisol (vpravo) (Glaser et al. 2001).
10. Obr. 10: Srovnání retenční schopnosti běžné půdy a půdy s přidáním biocharu (Hussain et al. 2020).
11. Obr. 11: Testovací nastavení a senzory (a – půdní sloupce; b – simulátor srážek; c – senzor a záznamník dat) (Huang et al. 2020).
12. Obr. 12: Pohled na experimentální stavební buňky (Tan et Wang 2023).
13. Obr. 13: Pohled na experimentální zelenou střechu z letecké mapy.
14. Obr. 14: Schéma extenzivní experimentální střechy (Červené body označují umístění snímačů Teros 11, které se nacházejí v každém poli experimentální střechy).
15. Obr. 15: Experimentální pole, která jsou rozdělena na 6 částí.
16. Obr. 16: Čidlo Teros 11 (METER Group 2019).

17. Obr. 17: Umístění senzoru Teros 11 v substrátu experimentální střechy.
18. Obr. 18: Meteorologická stanice Atmos 41 (METER Group 2019).

9. Seznam obrázků, tabulek a grafů

Seznam obrázků:

Obr. 1: Visuté zahrady Semiramidiny (Visuté zahrady babylonské).....	4
Obr. 2: Tradiční zelené střechy na Islandu.....	5
Obr. 3: Moderní extenzivní zelená střecha v Berlíně-Kreuzbergu	6
Obr. 4: Biotopní zelená střecha, Chiba University, 10. července 2015	7
Obr. 5: Extenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko	8
Obr. 6: Intenzivní jednoduchá zelená střecha; Green Ville, Brno, Česko	9
Obr. 7: Intenzivní střecha; Green Ville, Brno, Česko	10
Obr. 8: Příklad skladby vrstev zelené střechy	10
Obr. 9: Terra Preta (vlevo) a Oxisol (vpravo).....	16
Obr. 10: Srovnání retenční schopnosti běžné půdy a půdy s přidáním biocharu	24
Obr. 11: Testovací nastavení a senzory (a – půdní sloupce; b – simulátor srážek; c – senzor a záznamník dat)	25
Obr. 12: Pohled na experimentální stavební buňky	26
Obr. 13: Pohled na experimentální zelenou střechu z letecké mapy	32
Obr. 14: Schéma extenzivní experimentální střechy (Červené body označují umístění snímačů Teros 11, které se nacházejí v každém poli experimentální střechy.).....	33
Obr. 15: Experimentální pole, která jsou rozdělena na 6 částí.....	33
Obr. 16: Čidlo Teros 11 (METER Group 2019).....	35
Obr. 17: Umístění senzoru Teros 11 v substrátu experimentální střechy	36
Obr. 18: Meteorologická stanice Atmos 41 (METER Group 2019).....	37

Seznam tabulek:

Tab. 1: Dělení střech podle sklonu.....	6
Tab. 2: Fyzikální a chemické vlastnosti střešních a zemních podkladů při různých rychlostech přidavků biocharu	27
Tab. 3: Fyzikálně-chemické vlastnosti půdy zelené střechy	28
Tab. 4: Vlastnosti extenzivního střešního substrátu Florcom (SSE) uvedené výrobcem BB COM s.r.o., 2021	29
Tab. 5: Průměrné hodnoty vlastností biocharu vyrobeného ve Zlaté Olešnici	31
Tab. 6: Druhy rostlin vysazené na experimentální střeše	34

Seznam grafů:

Graf 1: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhrn srážek (mm/den) – červen 2021	40
Graf 2: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhrn srážek (mm/den) – červen 2022	41
Graf 3: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhrn srážek (mm/den) – srpen 2021	43
Graf 4: Objemový obsah vlhkosti v substrátech experimentálních extenzivních polí (%) a úhrn srážek (mm/den) – srpen 2022	43