VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD Z OBJEKTŮ MODROZELENÉ INFRASTRUKTURY

WASTEWATER TREATMENT FROM BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE OBJECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Kryštof Hradil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav vodního hospodářství obcí
Student:	**Kryštof Hradil**
Vedoucí práce:	**prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA**
Akademický rok:	2024/25
Studijní program:	B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Čištění odpadních vod z objektů modrozelené infrastruktury

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce bude zaměřena na problematiku odstraňování znečištění ze zelených střech a zelených stěn adsorpcí. V první části bude zpracována rešerše problematiky zelených střech a zelených stěn a technologií adsorpce se zaměřením na biochar. V druhé části práce budou provedeny praktické filtrační testy zaměřené na čištění vod ze zelených střech a zelených stěn v laboratoři centra AdMaS.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Získat teoretické a praktické znalosti v oblasti hospodaření s dešťovými vodami se zaměřením na zelené střechy a zelené stěny a odstraňování znečištění z odtékajících vod adsorpcí. Zpracovat případovou studii demonstrující získané znalosti.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Metcalf + Eddy: Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse, McGRAW-HILL, New York1985

[2] Hlavinek P. a kol. Hospodaření s dešťovými vodami v urbanizovaném území, ARDEC, ISBN 8086020-55-X.

[3] Hlavínek P., Mičín J., Prax P.: Příručka stokování a čištění, ISBN 80-86020-30-4, NOEL 2000, Brno2001.

[4] Krejčí a kol.: Odvodnění urbanizovaných území-koncepční přístup, ISBN 80-86020-39-8, NOEL2000, Brno 2002.

[5] Sborníky Water Science and Technology, IWA Publishing.

[6] Časopisy SOVAK, VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 11. 11. 2024

L. S.

doc. Ing. Petr Hluštík, Ph.D. vedoucí ústavu	prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na problematiku čištění odpadních vod z objektů modro-zelené infrastruktury. V první části bude zpracována rešerše problematiky zelených střech a zelených stěn a technologie adsorpce se zaměřením na biochar. V druhé části práce budou provedeny praktické filtrační testy zaměřené na čištění vod ze zelených střech a zelených stěn v laboratoři centra AdMaS.

KLÍČOVÁ SLOVA

modrozelená infrastruktura, zelená střecha, zelená stěna, dešťová voda, adsorpce, biochar

ABSTRACT

The thesis focuses on the issue of wastewater treatment from blue-green infrastructure elements. The first part will include a literature review on green roofs and green walls, as well as adsorption technologies, with a particular focus on biochar. The second part will involve practical filtration tests aimed at purifying water from green roofs and green walls, carried out in the laboratory of the AdMaS Center.

KEYWORDS

blue-green infrastructure, green roof, green wall, rainwater, adsorption, biochar

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRADIL, Kryštof. *Čištění odpadních vod z objektů modrozelené infrastruktury*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Čištění odpadních vod z objektů modrozelené infrastruktury* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2025

Kryštof Hradil

autor

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval prof. Ing. Petrovi Hlavínkovi, CSc., MBA za vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomášovi Chorazymu, Ph. D. za vedení a spolupráci na praktické části bakalářské práce, za zaučení na všech potřebných laboratorních přístrojích a za jeho cenné rady během samotného provedení experimentu.

OBSAH

ÚVOD 10
2 MODROZELENÁ INFRASTRUKTURA 11
2.1 OBJEKTY MODROZELENÉ INFRASTRUKTURY 11
2.1.1 Zelené střechy 11
2.1.2 Simulační počítačový program „RWS“ 16
2.1.3 Technické řešení úpravy dešťové vody u zelených střech 17
2.1.4 Zelené stěny 19
2.2 DEŠŤOVÁ VODA 23
2.2.1 Kvalita dešťové vody 23
2.2.2 Způsoby využití dešťové vody 25
2.2.3 Principy čištění dešťové vody 26
2.2.4 Biologické čištění dešťové vody ze zelených střech 28
2.2.5 Studie dešťových vod ze zelených střech 29
3 ADSORPCE 34
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY 34
3.1.1 Rozdělovací koeficient 35
3.1.2 Adsorbční izoterma 35
3.1.3 Rychlost adsorpce 36
3.1.4 Desorpce 37
3.1.5 Aktivace 37
3.1.5 Regenerace 37
3.1.6 Specifický povrch 37
3.2 MATERIÁLY ADSORBENTU 37
3.2.1 Aktivní uhlí 37
4 BIOCHAR 39
4.1 VÝROBA BIOCHARU 39
4.1.1 Pyrolýza 39
4.1.2 Zplyňování 40
4.2 VLASTNOSTI BIOCHARU 41
4.3 STUDIE O VYUŽITÍ BIOCHARU 42

5. ADSORPČNÍ TESTY BIOCHARU V CENTRU ADMAS..... 46
5.1 CÍL VÝZKUMU 46
5.2 ADSORPČNÍ MATERIÁL..... 49
5.3 POSTUP EXPERIMENTU..... 51
5.3.1 Skladba filtračního zařízení..... 51
5.4 VÝSLEDKY CHEMICKÉHO ROZBORU 53
5.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU……. 56
ZÁVĚR 58
LITERATURA..... 59
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN..... 62
SEZNAM TABULEK..... 64
SEZNAM OBRÁZKŮ 65

ÚVOD

V rámci urbanizovaných celků se stále zvětšuje množství zpevněných ploch, které zabraňují vsakování srážek. Z čehož vyplývá zvýšení objemu a rychlosti povrchového odtoku dešťové vody do kanalizační sítě. Klesá množství vody, která se přirozeně vsakuje a odpařuje a dostává se zpět do koloběhu vody. Z tohoto důvodů dochází k přetížení kanalizace a čistíren odpadních vod. Rovněž se zvyšuje množství nevyčištěné vody, která se dostává se do povrchových vod. S rychlým odtokem srážkových vod ze zpevněných ploch do kanalizace, potoků, řek roste pravděpodobnost povodní. Jedním z klíčových problémů je tedy způsob nakládání s dešťovými vodami, které jsou ve většině měst stále odváděny kanalizační sítí jako odpadní voda, bez využití jejich potenciálu.

Řešením hospodaření s dešťovou vodou je výstavba objektů modrozelené infrastruktury, která podporuje zadržování dešťové vody v místě dopadu a přispívá tak ke stabilizaci odtokových poměrů. Výstavba objektů modrozelené infrastruktury je také zásadním přínosem k omezení efektu městského tepelného ostrova, jenž vzniká v důsledku hromadění se tepla v urbanizovaném území. Teploty v urbanizovaném území jsou tak vyšší než v nezastavěném území. Hlavní příčinou tepelných ostrovů je zástavba budovami a také pozemními komunikacemi na původních plochách pokrytých vegetací. Zelené střechy a fasády, které patří k objektům modrozelené infrastruktury mají schopnost zadržovat dešťovou vodu, která se odpařuje pomaleji a městské prostředí se méně přehřívá.

Cílem této práce je seznámit se s problematikou hospodaření s dešťovými vodami se zaměřením na zelené střechy a zelené stěny a odstraňování znečištění z odtékajících vod adsorpcí se zaměřením na využití adsorbentu biocharu. Získané vlastnosti týkající se zejména principů úpravy dešťové vody odtékající ze zelených střech a adsorbentu biocharu budou využity při provedení experimentu ve výzkumném centru AdMaS.

V praktické části budou tedy provedeny filtrační testy v laboratoři výzkumného centra AdMaS. V rámci vyhodnocení těchto testů dojde k posouzení účinnosti adsorpčních schopností biocharu.

2 MODROZELENÁ INFRASTRUKTURA

Současná platná legislativa ukládá stavebníkům likvidovat dešťové vody na pozemku stavebníka za účelem zavedení decentralizovaného systému odvodnění území (zasakování nebo využívání dešťové vody na pozemku). Z čehož vyplývá pro majitele nemovitostí nutnost budovat na svých pozemcích vsakovací a akumulační objekty. Řešení těchto problému nabízí výstavba Modro-zelené infrastruktury, která je soustavou vodních a zelených prvků integrovaných do městského prostředí. Modro-zelená infrastruktura výrazně přispívá ke zmírnění dopadů klimatických změn, podporuje zadržování vody ve městech a také se podílí na zlepšení kvality ovzduší. [1][2][3]

2.1 OBJEKTY MODROZELENÉ INFRASTRUKTURY

K objektům modrozelené infrastruktury patří zelené střechy, které jsou známé také jako vegetační nebo živé střechy. Jsou to systémy, které umožňují růst různých typů vegetace na střechách budov. Dalším objektem modrozelené infrastruktury jsou zelené stěny nebo také vertikální systémy zeleně, které dovolují ekologizaci svislého povrchu budov (fasády, stěny, slepé stěny, dělicí stěny) [4]

2.1.1 Zelené střechy

Zelené střechy jsou jedním z možných řešení správného hospodaření s dešťovou vodou v zastavěném území, protože zadržují dešťovou vodu a zpomalují špičkový průtok, klesá tak akumulace vody na pozemku. Odvodnění zelené střechy představuje menší zátěž pro dešťovou kanalizaci ve srovnání s běžnými typy střech. Dešťová voda je částečně zadržována ve vrstvě, kde se buď vsakuje nebo je využita vegetací a uchována v jejich tkáních. Dochází také k odpařování vody, která se vrací zpět do atmosféry. Retenční potenciál každé zelené střechy závisí na typu a tloušťce použitého substrátu, typu drenážních prvků, ale také na typu vysazené vegetace a jejím pokrytí, objemu deště, době předchozího období sucha a sklonu zelené střechy. Z těchto faktorů je při zadržování vody významný použitý substrát. Vzhledem k tomu, že substráty využívané u zelených střech jsou většinou složeny z lehkých vulkanických materiálů, je kapacita zadržování vody vysoká. [2][5]

Zelené střechy také zvyšují kvalitu dešťové vody, tlumí kyselé deště a zadržují znečisťující látky. Při prosakování dešťové vody substrátem a vegetací však existuje možnost čištění i kontaminace. Substrát i vegetace zachycují prach a částice ze vzduchu a odstraňují je z dešťové vody. Substrát rovněž adsorbuje kovy z dešťové vody. Pokud je v dešťové vodě vysoká koncentrace iontů, dochází ke snížení jejich koncentrace v odtoku. Pokud je koncentrace iontů v dešťové vodě podstatně nižší než koncentrace v substrátu, pak je ze substrátu vyloučena část iontů a odtok dosahuje vyšší koncentrace iontů, než bylo původně v dešťové vodě. Velikost kontaminantů v odtoku je ovlivněna půdními mikroby v substrátu, složením substrátu a rovněž stářím substrátu. [2][5]

Mezi provedenými studiemi [6][7], které se týkají kvality odtoku vody ze zelených střech panují rozdíly v názorech na kvalitu vody z odtoku. Zelené střechy přispívají ke snížení spotřeby energie budov, jelikož zlepšují tepelný výkon budov. Dalšími přínosy zelené střechy je snížení hlukové zátěže, prodloužení životnosti střechy, snížení efektu tepelných ostrovů a větší množství zeleně v městském prostředí.[5]

Přestože zelené střechy mají značný potenciál pro hospodaření s dešťovou vodou, jejich výstavba je stále výjimečná. Realizace vegetačních střech je také v současnosti v České republice podporována finanční podporou ze státního fondu životního prostředí. Výzkumy sice jednoznačně potvrzují schopnost vegetačních střech zadržovat vodu, ale problémem zůstává v přizpůsobení těchto vlastností konkrétním podmínkám jednotlivých regionů. Mnoho zemí a obcí začalo zavádět nebo dokonce nařizovat zelené střechy v budovách. V současné době je v zemích jako USA, Kanada, Austrálie, Singapur a Japonsko vyvíjena značná iniciativa k instalaci zelených střech při výstavbě nových budov, ale také je podporována výstavba v případě starých budov. Například v Torontu platí nařízení o zelených střechách, kdy nová výstavba s podlahovou plochou $\geq$2000 m^2 musí zahrnovat zelenou střechu na 20–60% střešní plochy [8]. Také v Tokiu je uplatňováno nařízení, v případě soukromých budov větších než 1000 m^2 a veřejných budov větších než 250 m^2, v rámci něhož musí 20% střešní plochy pokrývat zelená střecha. Nedodržení tohoto nařízení je sankcionováno roční pokutou ve výši 2000 dolarů.[5][8]

Vegetační zelené střechy lze rozdělit podle hloubky substrátu a použitých rostlin na[5][9]:

- extenzivní
- intenzivní
- polointenzivní

Extenzivní zelené střechy se zřizují tam, kde střešní konstrukce nedosahuje vysoké nosnosti a není možné ji výrazně zatížit. Extenzivní zelené střechy nejsou navrženy pro běžný pohyb osob. Vyznačují se mocností vegetačního souvrství od 60 do 150 mm a z tohoto důvodu jsou vhodné pouze pro omezený typ vegetace např. trávy, rozchodníky, mechy a sukulenty. Výhodou extenzivních střech jsou jejich nízké pořizovací náklady, nízká hmotnost a rovněž minimální údržba. Z těchto důvodů jsou extenzivní zelené střechy nejběžněji používaným typem střech. [5][9] Na obrázku 1 je výsledek realizace extenzivní zelené střechy na rodinném domě ve Střílkách

Obrázek 1 Extenzivní vegetační zelená střecha ve Střílkách [9]

Intenzivní zelené střechy naopak slouží i jako klidové zóny nebo střešní zahrady, umožňující pohyb osob. Mocnost vegetačního souvrství je zpravidla vyšší než 300 mm. Vzhledem k výšce půdy je výběr rostlin rozmanitější, může zahrnovat i keře a malé stromy. Nevýhodou intenzivní zelené střechy jsou vysoké pořizovací náklady, náročnější údržba ve formě hnojení, pletí a zalévání a také její větší hmotnost. Tento typ střechy vyžaduje samostatný zavlažovací systém. [5][9] Na obrázku 2 je ukázka realizace intenzivní zelené střechy.

Obrázek 2 Ukázka realizace intenzivní zelené střechy [9]

Polointenzivní zelené střechy se nejlépe hodí pro instalaci na plochých střechách. Kromě rostlin používaných k výsadbě u extenzivních střech je lze osadit také trvalkami a menšími dřevinami, které vyžadují větší množství vody a živin. Mocnost vegetačního souvrství se pohybuje od 150-350 mm. Tyto střechy vyžadují častou údržbu a jejich pořizovací náklady jsou značně vysoké. [5][9] Na obrázku 3 je ukázka realizace polointenzivní zelené střechy.

Obrázek 3 Ukázka realizace polointenzivní zelené střechy [9]

Zelené střechy se také rozdělují podle přístupnosti a to na [5][9]:

- nepochozí
- pochozí
- pobytové

Nepochozí zelené střechy nejsou určeny pro běžný pohyb osob, vstup je povolen za účelem provedení kontroly a údržby. Pochozí střechy umožňují omezený přístup. Aby nedošlo k poškození vegetace jsou na nich vybudovány chodníky z kameniva, dlažby nebo, kamene. Pobytové zelené střechy jsou navrženy pro běžný pohyb lidí. Jsou to zejména soukromé terasy a střechy bytů a rodinných domů nebo veřejně přístupné plochy, u kterých je umožněn přístup široké veřejnosti. [5][9]

Dalším kritériem, podle něhož lze rozdělit zelené střechy jsou jejich doplňkové funkce. Podle doplňkové funkce se tedy dělí na [5][9]:

- retenční
- zelené střechy podporující biodiverzitu
- pěstební
- biosolární

Retenční zelené střechy jsou navrženy tak, aby zadržely maximální množství srážkové vody a tím zpomalily její odtok do kanalizace. V případě extenzivní střechy však může výrazná schopnost vegetačního souvrství zadržovat vodu představovat problém. Hydroakumulační vrstva podporuje růst plevele, který vytlačuje suchomilnou vegetaci. Vhodným řešením retenční zelené střechy je její rozšíření na střešní kořenovou čistírnu šedé vody. Přečištěnou šedou vodu lze použít pro závlahu jiných ploch např. v okolí budov. Zelené střechy podporující biodiverzitu se zaměřují na vytváření prostředí, které podporuje různorodost rostlinných a živočišných druhů a vytváří vhodné prostředí pro životní cyklus široké škály druhů rostlin a živočichů. Pěstební zelené střechy jsou určeny pro pěstování ovoce a zeleniny. Zde se pro pěstování rostlin využívají nádoby nebo zvýšené záhony. V případě biosolární zelené střechy lze docílit větších přínosů než při využití zelené střechy nebo fotovoltaických panelů zvlášť. Protože účinek fotovoltaických panelů v létě při teplotě nad 25 stupňů klesá, je ochlazující efekt vegetace přínosem. [5][9] Na obrázku 4 je ukázka realizace biosolární zelené střechy.

Obrázek 4 Ukázka realizace biosolární zelené střechy [9]

Co se týče realizace zelených střech, jsou pro ni nejvhodnější samostatně stojící rodinné domy, u kterých je stupeň zpevnění pouze 20 %. Pozemky u těchto rodinných domů mají dostatečný prostor k umístění zařízení pro zasakování vody nebo akumulačních nádrží. Nejméně vhodné se pro realizaci jeví obchodní oblasti, jelikož stupeň zpevnění je 80 % až 95 %. Voda ze zpevněných ploch je zde silně znečištěná a nároky na úpravu jsou zde větší než v případě rodinných domů. [1]

2.1.2 Simulační počítačový program „RWS“

K výpočtu retenčního výkonu v jednotlivých regionech je v Německu používán simulační počítačový program „RWS“ (RWS je zkratka pro „RegenWasserSpeicher“ (tzn. zásobárna dešťové vody). Při použití tohoto programu je možné zohlednit regionální podmínky, druh zelené střechy, sklon střechy, velikost plochy a regionální údaje o množství srážek. [10]

Po zadání potřebných vstupních údajů program provede simulaci procesů akumulace a výparu na základě reálných srážkových dat. Výstupem jsou hodnoty jako roční objem odtoku, dlouhodobý průměrný odtok a maximální špičkové průtoky, přičemž výsledky jsou seřazeny sestupně a je uvedena pravděpodobnost jejich výskytu. Výpočty jsou provedeny nejen pro zadanou plochu, ale také pro plochu o velikosti jednoho hektaru. Tento model poskytuje spolehlivé informace o retenčních schopnostech daného typu zelené střechy a umožňuje dlouhodobé sledování místních srážkových dat v pětiminutových intervalech. [10]

Data získaná prostřednictvím tohoto simulačního programu lze vyžádat u příslušné meteorologické služby a využít je pro případnou realizaci zelené střechy např. kolik srážkové vody zadrží zelená střecha průměrně za 1 rok nebo s jakým maximálním špičkovým odtokem se musí u zelené střechy počítat. Pomocí tohoto programu byla např. provedena srovnávací simulace fóliové střechy a extenzívní zelené střechy. U obou střech byla uvažována tloušťka 15 cm a sklon střechy 2 %. Výsledkem této simulace bylo, že fóliová střecha měla při použití reálných srážkových poměrů ve Frankfurtu roční srážkový úhrn cca 580 mm a maximální špičkový odtok 54 l/s x ha. Zatímco u zelené střechy činil za stejné období maximální odtok 22 l/s x ha. Z těchto výsledků je patrné, že zelená střecha má své nesporné výhody v procesu nakládání s dešťovou vodou. [10]

2.1.3 Technické řešení úpravy dešťové vody u zelených střech

Vrstvy zelených střech se obecně dělí na vegetační souvrství a souvrství střešního pláště. Vegetační souvrství zahrnuje vegetaci, mulčovací vrstvu, substrát, hydroakumulační vrstvu, filtrační vrstvu a také drenážní vrstvu. Souvrství střešního pláště je tvořeno ochrannou vrstvou hydroizolace, hydroizolační vrstvou odolnou vůči kořenům rostlin, tepelné izolace, parozábrany, spádové vrstvy a nosné konstrukce. [2][3][9]

K odvádění dešťové vody je možné využít buď gravitační nebo podtlakový systémem odvodnění. V případě využití gravitačního odvodnění je voda odváděna potrubím beztlakovým prouděním. Oproti tomu podtlakový systém pracuje na principu úplného zaplnění potrubí, čímž se na jeho horním konci vytváří podtlak. Pro tento systém se využívají speciální střešní vtoky. Počet vtoků se odvíjí od plochy, která je odvodňována. Doporučuje se, aby jedna střecha byla odvodněna minimálně dvěma vtoky. Je nezbytné, aby byl střešní vtok chráněný revizní šachtou s víkem. Revizní šachta slouží ke kontrole, odstranění rostlin a nečistot v jejím okolí. [2][3][9]Na obrázku 5 je ukázka střešního vtoku chráněného revizní šachtou.

Obrázek 5 Střešní vtok s revizní šachtou [9]

U zelných střech se pro odvodnění využívá podélný způsob vedení vody, který se umísťuje rovnoběžně s okapovou hranou nebo ve střešním úžlabí. Odvod je zajištěný pomocí drenážní trubky, jenž je napojena na střešní odvod, vtok či žlab. Systém pro hospodaření s dešťovou vodou se skládá z filtrů umístěných v okapových žlabech, akumulační nádrže, sací soupravy s plovákem, přepadového sifonu, čerpadla, řídicí jednotky, senzoru hladiny a rozvodného potrubí. [2][9]

Při čištění dešťové vody, která je svedena do akumulační nádrže se uplatňují dva procesy, kterými jsou filtrace a sedimentace. Sedimentace většinou probíhá v akumulační nádrži, ale lze také využít samostatnou usazovací nádrž jako předstupeň. Pro účely filtrace se používají dva typy filtrů, a to interní nebo externí. Externí filtry představují samostatné filtrační šachty, které se instalují mezi okapový svod a samotnou nádrž. Externí filtry umožňují propojení dvou větví okapových svodů a po přefiltrování vody odtéká čistá voda do nádrže. Interní filtry se nacházejí přímo uvnitř nádrže a disponují pouze jedním přítokem. [2][3][9]

Pro uskladnění dešťové vody se využívají zejména akumulační nádrže. Z hlediska umístění se nejvhodnější jeví umístění akumulační nádrže pod zem. Povrchové nádrže se obvykle využívají jen ke krátkodobému zadržení dešťové vody. Akumulační nádrž by měla být instalována v dostatečné vzdálenosti od inženýrských sítí a také od stromů. Důležitou vlastností těchto nádrží je jejich vodotěsnost a schopnost odolat tlaku okolní zeminy. Každá nádrž musí být vybavena vstupním poklopem a přelivem, kterým by měla voda v první řadě odtékat do vsakovacího zařízení. Pro zajištění funkčnosti a dlouhé životnosti je třeba chránit akumulační zařízení před mrazem, nadměrnými teplotami a přímým slunečním zářením, například umístěním pod úroveň terénu. Nádrže se vyrábějí

z materiálů jako beton, ocel, PVC-U, polyetylén, polypropylén nebo skelný laminát. V současné době jsou nejvíce využívány nádrže z plastu, které jsou již standardně vybaveny potřebnými vývody, vstupním komínem, bezpečnostním poklopem a jsou tak připraveny pro instalaci filtračního systému. Mezi hlavní výhody plastových nádrží patří jejich nízká hmotnost a snadná instalace. Betonové nádrže se instalují v oblastech, ve kterých je vysoká hladina spodní vody. Jejich předností je, že v nich dochází k bezprostřední neutralizaci kyselé dešťové vody. [2][3][9]

2.1.4 Zelené stěny

Jako zelené stěny se označují vegetační povrchy stěn (fasády, stěny, slepé stěny, dělící stěny). Zelené stěny lze stejně jako zelené střechy využít pro hospodaření s dešťovou vodou. Výhodou zelených stěn je, že přispívají k zachycení srážek a snížení rychlosti odtoku dešťové vody. Zelené stěny také zlepšují kvalitu ovzduší, snižují teplotu a zmírňují tak účinek tepelného ostrova ve městech. Dle dostupné studie [10] by zvýšení podílu zelené stěn o 10 % mohlo snížit průměrné teploty vzduchu o 2,5 °C.[12].

Aplikace zelených stěn má kromě environmentálních aspektů také sociální a ekonomické výhody. Přítomnost vegetace ve městech prostřednictvím zelených stěn zlepšuje vzhled měst, zvyšuje hodnotu nemovitostí. V neposlední řadě zelené stěny fungují jako tepelná a akustická ochrana. Zelené stěny přispívají ke snížení energetické náročnosti na vytápění nebo chlazení budov. Zelené stěny mají větší potenciál než zelené střechy vzhledem k tomu, že ve městech může být rozsah fasádní ekologizace větší oproti velikosti střešních ploch. [12].

Zelené stěny se dělí na [4][13]:

- zelené fasády
- živé stěny.

V případě zelených fasád se používají popínavé nebo závěsné rostliny, které rostou podél stěn. Rostliny rostou buď směrem nahoru po svislém povrchu nebo směrem dolů, když jsou zavěšeny v určité výšce. Zelené fasády mají obvykle pomalé povrchové pokrytí a zahrnují omezený výběr rostlin. [4][13]

Zelené fasády lze rozdělit na[4][13]:

- přímé zelené fasády
- nepřímé zelené fasády

U přímých fasád jsou rostliny připevněny přímo ke stěně. Jejich nevýhodou je, že se spoléhají na schopnost popínavých rostlin přichytit se ke svislé ploše, Když vegetace dosáhne plného pokrytí, může se stát těžkou a zvyšuje se riziko pádu. Nepřímé zelené fasády mají podpůrnou konstrukci (kabely, dráty, mříže, síťoviny vyrobené většinou z pozinkované oceli) a vytvářejí vzduchovou mezeru mezi povrchem budovy a vegetací. Ocelové konstrukce a kabely se využívají k držení popínavých rostlin s hustším olistěním. Mřížky a drátěné sítě, jenž mají menší rozestupy, jsou vhodné pro podporu pomalu rostoucích rostlin. Konstrukce zde zabraňuje případnému pádu vegetace, protože ukotvuje a drží rovnováhu vegetace a stává se tak odolnou vůči větru, dešti, sněhu. U nepřímých zelených fasád jsou rostliny zakořeněny přímo v zemi nebo v květináčích a mohou být vedeny tak, aby se vyvíjely podél podpůrné konstrukce.[4][13]

Nepřímé systémy zahrnují dva druhy řešení [13]:

- kontinuální
- modulární

Kontinuální řešení využívá jednu podpůrnou konstrukci, která řídí vývoj rostlin podél celého povrchu. U modulárního řešení je instalováno několik modulárních propojených prvků podél povrchu. Hlavní rozdíly jsou v tom, že modulární mříže mají nádoby pro zakořeňování rostlin, které umožňují zavěšení podél stěny v různých výškách a individuální podpůrnou strukturu pro vedení rostlin. Nové formy modulárních mříží zahrnují zakřivenou mřížku, která dodává fasádě trojrozměrnost stěny. Většina modulárních systému využívá pro pěstování rostlin směs lehkého substrátu a zrnitého porézního materiálu (minerální granule se středními až jemnými částicemi, kokosovými vlákny nebo recyklovanou tkaninou), aby bylo možné dosáhnout dobré kapacity zadržování vody. [13]

Na obrázku 6 vlevo je ukázka realizace zelené fasády s popínavými rostlinami, které rostou přímo u stěny budovy s detailním záběrem kořenového systému. Vpravo pak použití podpůrné konstrukce (panelů) rostlin připevněné ke stěně budovy. Nevýhodou použití panelů jsou jejich vysoké náklady na instalaci a údržbu související se zavlažováním a výměnou zařízení. [14]

Obrázek 6 Zelená fasáda a obytná stěna [14]

Živé stěny umožňují rovnoměrnější růst vegetace podél svislé plochy a začlenění většího množství různých odrůd rostlin. Tyto stěny vznikly, aby umožnily integraci zelených stěn ve vysokých budovách. Živé stěny umožňují rychlé pokrytí velkých ploch. Jsou schopné se přizpůsobit všem druhům budov. Systémy živých stěn vyžadují časté zavlažování a zásobování živinami. Tyto potřeby závisí na použitém typu systému, použitých rostlinách a také na klimatických podmínkách. [13]

Také u živých stěn mají systémy kontinuální nebo modulární řešení podle způsobu jejich aplikace. Kontinuální systémy využívají rám připevněný ke stěně, který tvoří prázdný prostor mezi systémem a povrchem. Tento rám drží základní panel a chrání stěnu před vlhkostí. Základní panel podporuje další vrstvy. Je pokryt vrstvami propustných, pružných a kořenově odolných sít, jež jsou k němu upevněny. Vnější vrstva se pak odřízne a vytvoří se tak kapsa pro výsadbu jednotlivých rostlin. Kontinuální systémy

nemají substrát, používají pouze lehké, absorpční síta, kde jsou rostliny vloženy do kapes. Kontinuální systémy vyžadují trvalý přísun vody a živin kvůli nedostatku substrátu. U těchto systému je proto nezbytný zavlažovací systém, který je instalován v horní části konstrukce připojené k centrálnímu zavlažovacímu systému. Propustné síto umožňuje rovnoměrnou distribuci vody podél povrchu. [13]

Modulární řešení se skládá z prvků, ve kterých je substrát po výsadbu rostlin. Každý prvek je podepřen doplňkovou strukturou nebo upevněn přímo na svislé ploše. Tyto systémy se liší dle použitých prvků (např podnosů, nádob), ale také dle hmotnosti a způsobu montáže. Prvky se vyrábí z lehkých plastů nebo kovových plechů např. pozinkované oceli. Některé modulární systémy ve formě táců obsahují v horní části modul pro vložení zavlažovací trubice. Na dně táců jsou umístěny otvory určené k tomu, aby přebytečná voda mohla zavlažovat moduly pod nimi. Podnosy obsahují několik otvorů pro zalévaní gravitací. [13] Na obrázku 7 je ukázka realizace živé stěny na budově Caixa Forum, v Madridu, realizována v červnu 2013.

Obrázek 7 Ukázka realizace živé stěny [13]

Nové koncepty živých stěn zahrnují použití zeleniny a bylin v osazení stěn, čímž by se zvýšil potenciál systému živých stěn, a to zejména ve městech, kde je nedostatek půdy pro pěstování. [13] Na obrázku 8 je ukázka realizace modulární živé stěny s jedlými rostlinami.

Obrázek 8 Ukázka modulární živé stěny s jedlými rostlinami [13]

2.2 DEŠŤOVÁ VODA

Jedním z nejdůležitějších fyzikálně-chemických parametrů kvality vody je její pH. Dešťová voda v České republice dosahuje hodnot pH v rozmezí 4,4 až 6,5. Oxid uhličitý, který se do dešťové vody dostává ze vzduchu zvyšuje její kyselost dešťových srážek. V případě, že hodnota pH dešťové vody dosáhne hodnoty nižší než 5,5, je déšť považován za kyselý, což má samozřejmě negativní dopad na životní prostředí. [15]

2.2.1 Kvalita dešťové vody

Dešťová voda může být kontaminována látkami pocházejícími ze znečištěného ovzduší. V oblastech, v nichž je vysoká míra znečištění ovzduší tak dochází ke zhoršení kvality dešťové vody. Mezi znečišťující látky patří kyselinotvorné látky (např. kyselina sírová, dusičná, chlorovodíková) a také zásadité látky (např. uhličitan vápenatý, uhličitan hořečnatý). Mezi hlavní zdroje kyselinotvorných látek patří emise z výfukových plynů, spalování fosilních paliv a plastů. Zásadité látky pocházejí převážně z činností spojených se zemědělstvím. Dalším faktorem, který ovlivňuje kvalitu dešťové vody, jsou lesní

požáry, které se vyskytují v mnoha zemích a způsobují tak zvýšení koncentrací alkalických kovů. [1][3][15]

Dešťová voda odtékající ze střech může být znečištěna různými organickými látkami, jako jsou pyl, spadané listí, drobné větvičky nebo trus ptáků. Na její kvalitu má vliv také typ materiálu, z něhož jsou odvodňované povrchy vyrobeny.[1][3][15]

Míru znečištění srážkových vod lze zařadit do tří skupin podle znečištění nerozpuštěnými látkami, těžkými kovy a uhlovodíky v závislosti na typu ploch. Norma TNV 75 9011 (Hospodaření se srážkovými vodami) dělí tyto plochy dle následující tabulky. [16]

Tabulka 1 Orientační klasifikace znečištění srážkových vod [16]

Typ plochy	Míra znečištění srážkových vod
- Vegetační střechy - Střechy z inertních materiálů - Střechy s plochou neošetřených kovových částí do 50 m^2 - Komunikace pro chodce a cyklisty - Málo frekventovaná parkoviště osobních aut - Málo frekventované pozemní komunikace[a] (příjezdy k domům)	nízká
- Střechy s plochou neošetřených kovových částí 50 m^2 až 500 m^2 - Středně frekventované pozemní komunikace[b] - (Vysoce) frekventovaná parkoviště (osobní auta a autobusy)	střední
- Střechy s plochou neošetřených kovových částí nad 500 m^2 - Vysoce frekventované pozemní komunikace[c] - Plochy u skladišť, manipulační plochy - Komunikace zemědělských areálů - Parkoviště nákladních aut[d]	vysoká

V normě TNV 75 9011 jsou rovněž uvedeny typické znečišťující látky na jednotlivých typech ploch a očekávané znečištění srážkových vod. [16] V tabulce 2 je uveden přehled těchto látek.

Tabulka 2 Typické znečišťující látky [16]

Typ plochy		Hrubé nečistoty, splaveniny	Jemné částice	Těžké kovy	Uhlovodíky	Organické znečiš-tění, BSK_5	Živiny N, P	Patogenní mikroorganizmy	Chloridy
Střechy	vegetační extenzivní	○	○	○	○	○	○	○	○
	vegetační intenzivní	○	○	○	○	●	●	○	○
	inertní	●	●	○/●	○/●	○/●	○/●	○/●	○
	s plochou neošetře-ných kovových částí do 50 m^2	●	●	●	○/●	○/●	○/●	○/●	○
	s plochou neošetře-ných kovových částí 50 m^2 až 500 m^2	●	●	●●	○/●	○/●	○/●	○/●	○
	s plochou neošetře-ných kovových částí nad 500 m^2	●	●	●●●	○/●	○/●	○/●	○/●	○

○	neznečištěná srážková voda
●	mírně znečištěná srážková voda
●●	středně znečištěná srážková voda
●●●	vysoce znečištěná srážková voda
/	až

Ke změně kvality dešťové vody může také dojít během jejího skladování v nádržích. Pokud bude dešťová voda vystavena při jejím skladování vysokým teplotám, je pravděpodobné, že bude vykazovat vysokou mikrobiální zátěž. Mikrobiální kontaminace ve skladované dešťové vodě je hlavním zdravotním rizikem. Pokud by tato voda byla konzumována jako pitná voda, musela by být podle stávající legislativy bez koliformních bakterií, virů a cyst prvoků a musela by vykazovat více než jednu nefelometrickou zákalovou jednotku (NTU) zákalu. V případě použití např. pro zavlažování neexistují mikrobiologické předpisy. [15]

2.2.2 Způsoby využití dešťové vody

Dešťovou vodu lze využít k zavlažování, splachování toalet, praní, úklidu, mytí aut nebo k naplnění bazénu. Protože je dešťová voda měkká, je její využití k některým účelům vhodnější než použití vody pitné, jenž se často vyznačuje velkou tvrdostí. Nejčastější využití dešťové vody je na zavlažování. Dešťová voda obsahuje jen minimální množství solí, a proto nezpůsobuje zasolování půdy, což ji činí ideální pro zavlažování rostlin.

Při použití dešťové vody ke splachování navíc nevzniká vodní kámen. Pro praní je rovněž velmi vhodná, protože v měkké vodě se prací prostředky lépe rozpouštějí. V případě použití dešťové vody k praní je důležité mít zajištěn přívod jak užitkové, tak pitné vody. V současné době jsou již dostupné pračky, jež jsou vybaveny připojením k pitné i užitkové vodě. Další možností je využití srážkové vody jako pitné. Dešťová voda má v tomto ohledu své výhody – neobsahuje chlor, což ocení zejména osoby trpící alergiemi nebo kožními onemocněními. V současnosti se běžně používá řešení spočívající v instalaci filtračního zařízení přímo pod vodovodní baterii. Doporučuje se kombinace poddřezové reverzní osmózy, UV lampy a mechanického předfiltru. Dešťová voda tak může pokrýt až polovinu spotřeby pitné vody.[1][3]

2.2.3 Principy čištění dešťové vody

Úprava dešťové vody se provádí hlavně fyzikálně – chemickými metodami (adsorpce, filtrace), jenž jsou založeny na použití filtrace a adsorpčních materiálů, které umožňuji eliminaci částic velikosti koloidu, suspendovaných částic. Zatímco fyzikální metody využívají působení fyzikálních sil. U chemických metod je čištění dosaženo přidáním chemikálií nebo jinými chemickými reakcemi. Při chemickém srážení vzniká sraženina, kterou lze odstranit sedimentací, filtrací nebo membránovými procesy. Jedním z nejčastěji používaných filtračních materiálů je aktivní uhlí, dále je používán zeolit nebo biochar. Využití biocharu v čištění dešťové vody se budu detailně věnovat v samostatné kapitole. [15][17]

Adsorpce má své výhody zejména kvůli svému netoxickému účinku a vysoké míře odstranění organických složek z vod. Další výhodou je její nízká cena. Principem adsorpce se budu podrobněji zabývat v následující kapitole. [15][17]

Filtrace se týká především fyzikálního odstraňování nerozpuštěných látek. Filtrace se zaměřuje především na odstranění zákalu, barvy, mikroorganismů a částic, včetně těch, které jsou již ve vodě přítomny. Při vsakování vody přes půdu dochází na jejím povrchu a v hloubce 30 cm k výraznému hromadění pevných látek a mechanickému vázání suspendovaných částic. Vysoce výkonné odstranění částic dosažené filtračním procesem zvyšuje účinnost dezinfekce, protože odstranění nerozpuštěných látek ve vodě snižuje koncentraci většiny mikrobů. [15][17]

Biologické metody se používají hlavně k odstranění koloidních nebo rozpuštěných biologicky rozložitelných organických látek. Tyto látky jsou přeměněny na plyny, které unikají do atmosféry a biologickou hmotu (buněčné tkáně), kterou lze odstranit sedimentací nebo jinými metodami oddělení pevných látek. Tyto metody jsou založeny na použití přírodních materiálů, jako jsou adsorbenty a mikroorganismy, které zadržují a adsorbují těžké kovy, organickou hmotu, a živiny (fosfor a dusík) a rovněž umožňují odstranění perzistentních organismů, včetně predátorských bakterií a bakteriofágů. [15][17]

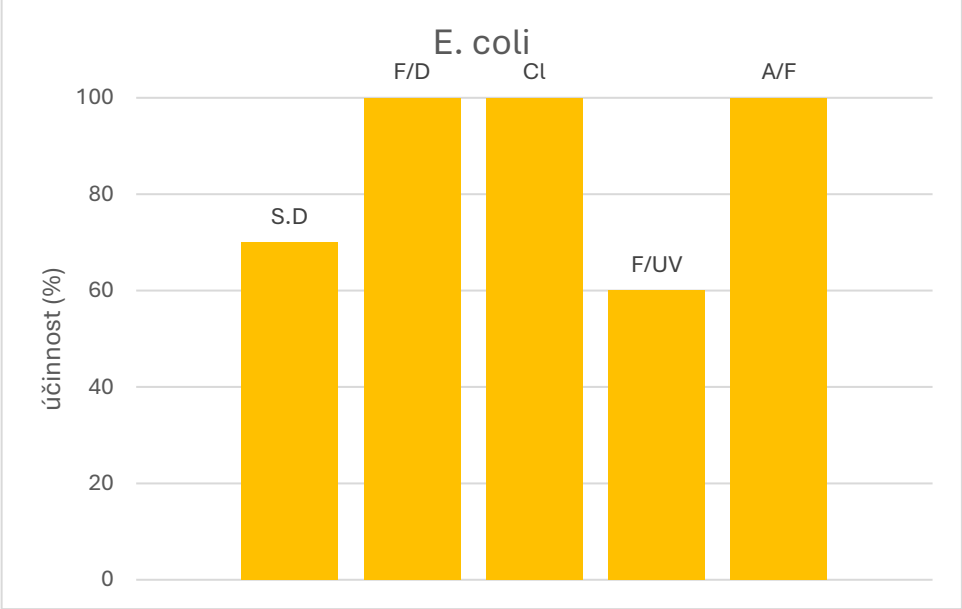
Mikroorganismy obsažené v půdě mají schopnost odbourávat škodlivé látky. Na biologických procesech v půdě se podílí také rostliny, a to prostřednictvím svých kořenů, kterými jsou schopny pojmout (např. měď, zinek). Tyto procesy lze kombinovat také s fyzikálními a chemickými metodami pro úpravu dešťové vody. Hlavní výhodou biologických procesů je, že nevyžadují použití chemických činidel např. koagulantů. Jsou jednoduché na údržbu a provoz a nezanedbatelná je taká nízká spotřeba energie. [17]

Mezi biologické metody se řadí biofiltry, bioretenční buňky, biosorpce a zelené střechy. Biofiltry účinně snižují mikrobiální kontaminanty v dešťové vodě a mohou být také snadno aplikovány jako předúprava pro stávající technologie. V biofiltrech se používají levné filtrační materiály, jako jsou směsi drceného vápence. [15][17]

Bioretenční buňky jsou složeny převážně z vysoce propustného písku kombinovaného s modifikovanými látkami a lokálními půdami a slouží k odstranění amoniakového dusíku. Účinek jeho odstranění je až 98 %, souvisí však s množstvím srážek. Když je množství srážek nízké, účinnost se zvyšuje a s přibývajícím množstvím srážek účinnost klesá, což má za následek negativní účinnost odstraňování. Využití retenčních buněk je proto vhodné pro lokality, ve kterých jsou slabé srážky. Účinnost retenčních buněk lze

zvýšit přidáním aditiva. V bioretenčních buňkách je široce používán jako aditivum biochar (biouhel). Tradiční bioretenční metody se ukázaly jako užitečné pro účinné odstraňování celkových nerozpuštěných látek, iontů těžkých kovů a tuků. Jejich účinnost při odstraňování dusíku, fosforu, CHSK a bakterií však není vysoká. [15][17]

Podle provedených studií [18][19][20] se ukázalo, že nejlepším odstraňovacím procesem v porovnání s principy F/*D* (filtrace/dezinfekce), *Cl* (chlorace), *F/UV* (filtrace/UV záření a *S. D (sol*ární dezinfekce) a jejich účinnosti v odstranění E.coli , TDS (rozpuštěných látek), živin, CHSK a BSK_5 je princip A/F (adsorpce, filtrace). Účinnost v odstranění E.coli , TDS, živin, CHSK a BSK_5 byla 100 % a účinnost odstranění zákalu byla 90 %.[15] Na obrázku 9 je znázorněna účinnost odstranění bakterie E.coli v závislosti na použitých principech čištění v uvedených studiích.



Obrázek 9 Účinnost odstranění E.coli [15]

2.2.4 Biologické čištění dešťové vody ze zelených střech

Pro úspěšné fungování zelené střechy je nezbytný optimální výběr substrátu. Většina výhod zelené střechy přímo koresponduje se substrátem zelených střech, jako je zvýšení kvality dešťové vody, snížení odtoku a tepelné výhody. Substrát adsorbuje znečišťující

látky a těžké kovy z dešťové vody, čímž zvyšuje její kvalitu. Substrát by měl mít vlastnosti jako je nízká hmotnost a vysoký poměr organických minerálů, které napomáhají růstu rostlin a samozřejmě také vysokou sorpční kapacitu. Tendence k vyluhování zeleného střešního substrátu byla předmětem různých výzkumů. Organické útvary v substrátu jako mulč, rašelina se doporučují jako nezbytné pro zajištění živin v zelených střechách. Některé výzkumy ukázaly, že organická hmota v substrátu zelené střechy ovlivňuje kvalitu odtokové vody zelené střechy.[21] [22]

Obecnou praxí je míchat různé složky v substrátu. Své využití často nachází komerční substrát. Substrát může zahrnovat různé materiály, jako je pemza, zeolit, scoria, vermikulit, perlit, rašelina, drcená cihla, rašelina, drcená cihla, ale také aktivní uhlí, biochar a další levné odpadní materiály. U zeleného střešního substrátu se doporučuje použít místní odpadní materiál, díky kterému může být zelená střecha ekonomicky výhodná. V zemích, kde nejsou zelené střechy komerčně dostupné, používají pro stavbu místní substrát.[22]

2.2.5 Studie dešťových vod ze zelených střech

Bylo provedeno spoustu studií, které se zabývaly fungováním zelených střech, a to už z hlediska retence, snížení odtoku dešťové vody a kvality dešťové vody. Některé z těchto studií se také věnovaly optimálnímu výběru substrátu pro co nejlepší fungování zelené střechy. Tyto studie se rovněž zaměřovali na přidání adsorbentů do substrátu a jejich vlivem na zvýšení kvality vody. Některé z těchto studií rozeberu v této části.

Studie v Malangu

Studie [23] byla provedena v budově rektorátu Státní univerzity v Malangu, v Indonésii. Množství dešťové vody bylo stanoveno podle srážek dopadajících na střechu budovy rektorátu, přičemž tato dešťová voda byla upravena pomocí systému pro zachytávání dešťové vody. Odběr a analýza dešťové vody probíhaly od listopadu 2017 do března 2018. Systém pro zachytávání dešťové vody se skládal z nádrže o objemu 42 litrů, filtrační nádoby vyrobené z odměrného skla o rozměrech 50 cm × 40 cm × 20 cm s výškou volné hladiny 15 cm. Rozvod dešťové vody zahrnoval PVC potrubí, uzavírací ventil a plastový kohoutek.

Experiment byl proveden s cílem zjistit vhodnou kombinaci filtračních médií složených ze zeolitu a aktivního uhlí. Bylo použito těchto pět variant:

T1: 100 % aktivní uhlí

T2: 75 % aktivní uhlí + 25 % zeolit

T3: 50 % aktivní uhlí + 50 % zeolit

T4: 25 % aktivní uhlí + 75 % zeolit

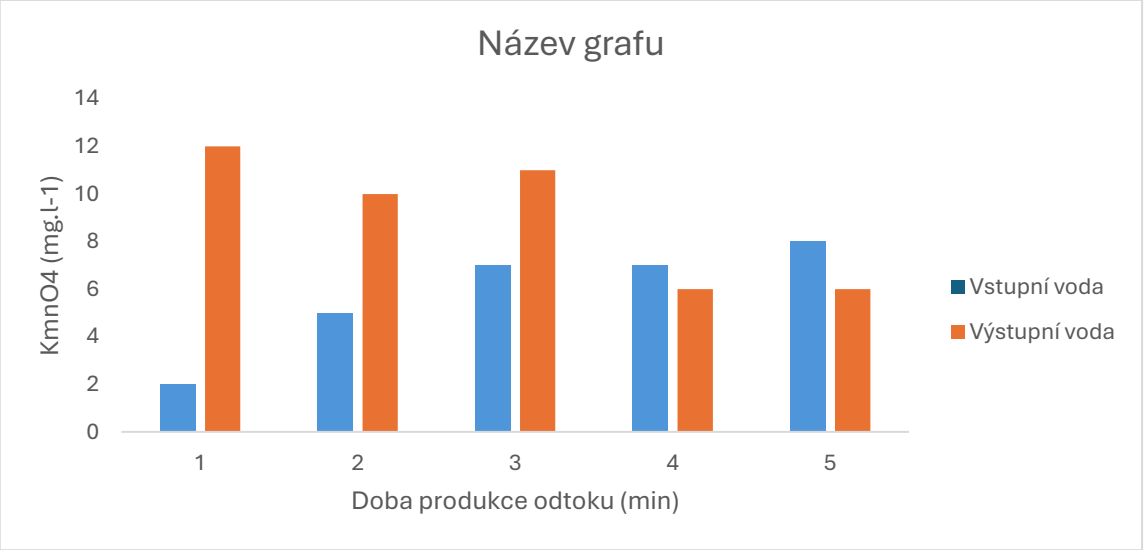
T5: 100 % zeolit

Vzorky vody byly odebírány z přítoku a odtoku (v trojnásobném opakování) a testovány na celkový obsah rozpuštěných látek (TDS), organické látky (měřené pomocí $KMnO_4$), koliformní bakterie, pH a teplotu. Výsledky ukázaly, že v případě TDS bylo nejlepší snížení koncentrace zaznamenáno u úpravy T4, došlo ke snížení o 37 % (z 249 mg/l na 158 mg/l). Ačkoliv T5 vykázal nejnižší hodnotu TDS po filtraci a to 99 mg/l, celkový trend snižování TDS byl podobný i u ostatních variant (T1–T3).

Výsledky ukazují, že koncentrace TDS ve výstupní vodě byla vyšší u úprav T1, T2 a T3, důvodem byl vyšší obsah aktivního uhlí ve filtru oproti zeolitu a rovněž tloušťka a nepravidelný tvar vrstvy aktivního uhlí, které mohly ovlivnit efektivitu odstranění pevných látek. Varianta T4 a T5, které obsahovaly vyšší podíl zeolitu, byly při snižování TDS úspěšnější. Zeolit má mikroporézní strukturu, která umožňuje zachytit velké množství molekul nebo rozpuštěných látek ve vodě. Zajímavostí je, že ve variantě T5 došlo po filtraci ke zvýšení TDS. Tento fakt byl zřejmě způsoben schopností zeolitu uvolňovat chemické prvky, například vápník, které zvyšují hodnotu TDS.

Dále byl vyhodnocen obsah manganistanu draselného ($KMnO_4$), jehož přítomnost souvisí se změnami fyzikálních vlastností vody jako je barva, zápach, chuť a zákal, což vede ke snížení kvality pitné vody. U úprav T1, T2 a T3 došlo ke zvýšení koncentrace $KMnO_4$ ve výstupní vodě (T1 z 2,1 mg/l na 12,3 mg/l, T2 z 4,87 mg/l na 10,3 mg/l, T3 z 6,70 mg/l na 10,8 mg/l). Příčnou bylo, že velikost molekul $KMnO_4$ je menší než póry v zeolitu, a také nízký podíl zeolitu u uvedených variant umožnil průchod částic filtračním médiem. Naopak u variant T4 a T5 došlo ke snížení koncentrace $KMnO_4$ (T4 o 19,4 % a T5 o 35 %). Snížení bylo u variant s větším podílem zeolitu. Tyto hodnoty můžeme porovnat na

obrázku 10. Na ose x jsou úpravy substrátů 1 až 5 (T1 až T5) a na ose y pak množství $KMnO_4$.



Obrázek 10 Množství $KMnO_4$ ve variantách substrátu [23]

Co se týče koliformních bakterií, které můžou způsobovat závažné zdravotní obtíže, jako jsou průjmy, horečky, nevolnosti, zvracení a zažívací potíže, došlo u varianty T1 ke snížení o 30 %, u T4 o 36 % a T5 o 29 %. U variant T2 a T3 došlo k mírnému zvýšení počtu koliformních bakterií.

Závěrem této studie bylo, že dešťová voda splňuje normy kvality pro čistou vodu. Je však potřebný další výzkum pro zlepšení úpravy dešťové vody a její širší využití jako zdroje čisté vody v městském prostředí a pro potřeby institucí jako jsou např. univerzity.

Studie v Indii

Tato studie [24] byla realizována na střeše Mechanical Sciences Block, IIT Madras, v Indii od března do června 2013. Pilotní systémy zelené střechy byly navrženy o velikosti 50 cm × 50 cm × 25 cm ze skla. Otvorem ve spodní části sestavy byl shromážděn odtok zelené střechy. Každá sestava se skládala ze tří vrstev a to 10 cm vrstvy substrátu, filtrační vrstvy a drenážní vrstvy. Byly použity dva zelené střešní substráty, místní zahradní půda složená z červené půdy, jílu, písku a kravského hnoje (sub-1) a optimalizovaný zelený střešní substrát (sub-2) složený z 20 % vermikulitu, 30 % perlitu, 10 % písku, 20 % drcených cihel a 20% kokosové rašeliny. Materiály použité k přípravě sub-2 byly získány lokálně a použity v původní podobě. Ve studii byly použity 4 pilotní sestavy: (GRA-1) - sub-1 bez vegetace, (GRA-2) - sub-2 bez vegetace, (GRA-3) - sub-1 s vegetací, (GRA-4) - sub-2 s vegetací. Následně byly provedeny simulace deště pomocí vody z vodovodu. Celkem bylo uvažováno 10 akcí s jednou akcí v rozsahu 5 mm. Poté byly odebrány vzorky na výstupu pro analýzu lehkých a těžkých kovů a dalších fyzikálně-chemických parametrů.

Pokud jde o pH, všechny čtyři sestavy vykazovaly potenciál zvýšit pH na neutrální, alkalické hodnoty. Průměrné pH vstupní vody z kohoutku zůstalo během všech událostí v rozmezí 4, 9–5, 1 (toto rozmezí pH se záměrně používá k simulaci kyselých dešťů). Jak GRA-1, tak GRA-2 byly schopny neutralizovat pH v rozmezí 7–8, zatímco GRA-3 a GRA-4 zvýšily výstupní odtok pH nad 8.Všechny sestavy zvýšily vodivost a TDS (celkové rozpuštěné pevné látky) v odtocích. Tento výskyt byl pravděpodobně způsoben vyluhováním kontaminantů ze substrátu. Vzhledem k velikosti vodivosti a hodnotám TDS byl pozorován několikanásobný nárůst odtoku produkovaného zelenými střešními sestavami během počátečních fází první události. Jako nejvyšší zdroj znečištění se choval (vysoká vodivost a TDS) GRA-1, pak následoval GRA-3, GRA-2 a poté GRA-4.

Analýza výsledků rovněž ukázala, že nejlepší adsorpční schopnosti při odstraňování kovových iontů (hliníku, železa, kadmia, mědi, chromu, niklu, olova a zinku) dosáhl GRA-4. Vermikulit, perlit a kokosová rašelina z kterých byl tento substrát vytvořen patří k známým adsorbentům, které přitahují kovové ionty. Z výsledků substrátu GRA-3 a GRA-4 je patrný význam rostlin. Rostliny vyžadují pro svůj růst minerální živiny. Po příjmu rostlin se vazebná místa substrátu uvolní, což zase umožňuje substrátu adsorbovat další prvky z přítokové kontaminované vody. Zpočátku substrát GRA-1 vykazoval potenciál adsorbovat kovové ionty, jejich koncentrace se však rychle zvyšovaly ve výstupních odtocích, jak události postupovaly, a nakonec dosáhly koncentrace vstupní vody z vodovodu. To ukázalo, že adsorpční kapacita byla značně omezená. U substrátu GRA-3 došlo ke snížení vyluhování lehkých kovů a zlepšení adsorpce těžkých kovů. Substrát GRA-2 dokázal snížit koncentrace olova a kadmia na nedetekovatelné limity, ale nebyl schopen zadržovat ionty vápníku a hořčíku během celých dešťových událostí. Také nebyl schopen adsorbovat ionty hliníku a železa, protože jejich koncentrace byly rovnoměrně vyšší než koncentrace vstupní vody z kohoutku.

Z této studie lze vyvodit schopnost zelené střechy adsorbovat různé kovy a neutralizovat kyselé srážky, což je hlavním přínosem pro použití těchto střešních systémů v oblastech, které jsou vystaveny kyselým dešťům. A také to, že zelené střechy mají potenciál zlepšit kvalitu dešťové vody. Nutností je však výběr vhodně zvoleného substrátu s adsorpčními schopnostmi.

3 ADSORPCE

Adsorpce patří k procesům, jež jsou společně s desorpcí označovány jako sorpce. Sorpce hraje klíčovou roli při rozdělování látek mezi kapalnou a pevnou složku prostředí, čímž ovlivňuje jejich pohyb. Rozpuštěné látky se pohybují spolu s kapalinou, zatímco pevné částice mohou být buď přenášeny (jako suspenze), nebo zůstávat na místě (např. v sedimentech či na povrchu pevných materiálů). U sedimentů nebo povrchové vrstvy transport neprobíhá. [25][26]

Adsorpce zvyšuje koncentraci specifické sloučeniny na rozhraní mezi dvěma fázemi. Specifické sloučeniny jsou transportovány z jedné fáze do druhé a poté přilnou k povrchům. Tento jev závisí především na chemii povrchu a povaze adsorbentu, sorbátu a typu systému mezi těmito dvěma fázemi. Adsorbát je látka, která je adsorbována na povrchu jiné látky, a látka k niž adsorbát přilne, se nazývá adsorbent. Během fyzikální sorpce dochází k disperzi a vodíkové vazbě mezi adsorbátem a adsorbentem. [25][26]

3.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Adsorpci lze definovat takto: *„Adsorpce je vázání molekul, které byly nejprve rozpuštěny ve vodě, na povrch pevné látky.“* [25] Adsorpce je zjednodušeně popsána jako dvoustupňový proces[25][26]:

1. transport rozpuštěné látky k fázovému rozhraní
2. přenos látky na povrch

Opakem adsorpce je desorpce, při které se molekuly, jež byly adsorbovány rozpouštějí.

Existují dva typy adsorpce[25][26]:

1. fyzikální adsorpce – tato vzniká na základě Van der Waalsových přitažlivých sil
2. chemisorpce – je tvořena chemickými vazbami

Z hlediska pevnosti je chemisorpce pevnější než fyzikální adsorpce.

3.1.1 Rozdělovací koeficient

Tento koeficient slouží k popisu sorpce určité látky v určitém prostředí. Rozdělovací koeficient se vyjadřuje pomocí tohoto vztahu [25]:

$$K_D=\frac{c_{ads}}{c_{rozp}}$$

kde: K_D je rozdělovací koeficient vyjadřující podíl adsorbované a rozpuštěné látky $[L^3M^{-1}]$

c_{ads} je množství adsorbované látky na jednotku pevné fáze $[MM^{-1}]$

c_{rozp} je koncentrace suspendovaných látek $[ML^{-3}]$

Hodnota rozdělovacího koeficientu je ovlivněna řadou faktorů, jako jsou vlastnosti dané látky, dostupnost sorpčních míst, hodnota pH, teplota nebo koncentrace jiných sorbovatelných látkách. V určitých podmínkách lze však K_D považovat za konstantní, například při stabilním rozmezí koncentrací, pH nebo velikosti částic. [25]

3.1.2 Adsorbční izoterma

Adsorpční izotermy charakterizují vztah mezi koncentrací rozpuštěné látky (c_{rozp}) a množstvím látky adsorbované v rovnovážném stavu (c_{ads}) při konstantní teplotě. Tyto izotermy mohou mít buď lineární, nebo nelineární průběh. Pomocí adsorpčních izoterm je popisována adsorpční rovnováha. Po určité době interakce mezi rozpuštěnými látkami a pevnou fází dojde k nastolení rovnovážného stavu mezi procesy adsorpce a desorpce. V případě, že proces sorpce probíhá hodně rychle dojde k okamžitému nastolení adsorpční rovnováhy. U pomalu probíhající sorpce je tento proces ovlivněn kinetikou. Adsorpční rovnováha určuje maximální množství látky, které je za daných podmínek možné adsorbovat. [25][26]

Adsorpční izotermy se dělí takto [25]:

- Lineární
- Konvexní
- Konkávní
- Sigmoidní

Mezi nejznámější adsorpční izotermy patří Langmuirova izoterma, Freundlichova izoterma a Lineární izoterma [25]:

Langmuirova izoterma (konvexní) [25]**:**

$$c_{ads}^{eq} = S_{tot} \frac{c_{rozp}}{K + c_{rozp}}$$

kde: c_{ads}^{eq} – rovnovážné množství látky adsorbované na pevné látce [MM^{-1}]

c_{rozp} – koncentrace látky rozpuštěné v tekutině [ML^{-3}]

S_{tot} – množství volných sorpčních míst, např. koncentrace částic v suspenzi [MM^{-1}]

K – parametr (poměr rychlosti adsorpce a desorpce) [MM^{-3}]

Freundlichova izoterma (podle hodnoty n konvexní i konkávní) [25]*:*

$$c_{ads}^{eq} = m c_{rozp}^{n}$$

kde: c_{ads}^{eq} – rovnovážné množství látky adsorbované na pevné látce [MM^{-1}]

m – Freundlichova konstanta

c_{rozp} – koncentrace látky rozpuštěné v tekutině [ML^{-3}]

n – konstanta vyjadřující měřítko nelinearity

Lineární izoterma (n=1, malé koncentrace rozpuštěné látky c_{rozp} <K) [25]

3.1.3 Rychlost adsorpce

Rychlost adsorpce lze vypočítat pomocí následujícího vzorce [25]:

$$r = p_{částic}^{-k}(c_{ads} - c_{ads}^{eq})$$

kde: r – rychlost sorpce [$ML^{-3}T^{-1}$]

$p_{částic}$ – množství částic nebo sedimentu (množství sorpčních míst) v objemu vody [ML−3]

k – koeficient v rychlosti reakce 1. řádu pro sorpci [T^{-1}]

c_{ads} – koncentrace látky adsorbované v tekutině [ML^{-3}]

c_{ads}^{eq} – rovnovážné množství látky adsorbované na pevné látce [MM^{-1}]

3.1.4 Desorpce

Desorpce je opačný proces absorpce. Při tomto procesu se molekuly, který byly absorbovány rozpouštějí. [25][26]

3.1.5 Aktivace

Při výrobě adsorpčních materiálů může dojít k ucpání prostorů mezi drobnými krystalky, čímž se snižuje jejich schopnost adsorpce. Aktivací jsou tyto prostory uvolněny a zvýší se tak specifický povrch adsorbentů. [25][26]

3.1.5 Regenerace

Regenerace adsoprce je proces, při kterém se adsorbent vymění za nový nebo připraví k opětovnému použití. Tento proces je důležitý pro udržení efektivnosti adsorpce a umožňuje její opětovné použití.[25][26]

3.1.6 Specifický povrch

Specifický povrch nebo také vnitřní povrch je důležitou veličinou charakterizující použitelnost adsorbentů (velikost povrchu pórů obsažených v 1 g adsorbentu). Abychom zjistili, jaký je specifický povrch adsorbentu, je nutné proměřit průběh adsorpční izotermy vhodného adsorbentu. [25][26]

3.2 MATERIÁLY ADSORBENTU

Nejčastěji používaným adsorbentem je bezesporu aktivní uhlí. Současné trendy však zahrnují kombinování s jinými absorbenty jako je např. zeolit. [27]

3.2.1 Aktivní uhlí

Příprava a výroba aktivního uhlí v sobě zahrnuje dva kroky, a to karbonizaci uhlíkaté suroviny při teplotě nižší než 800 °C v nepřítomnosti kyslíku, a dále aktivaci karbonizovaného produktu. Při výrobě aktivního uhlí se využívá buď fyzikální nebo chemická aktivace. Mezi využívané materiály k výrobě patří dřevo, černé, hnědé i dřevěné uhlí, lignit, kokosové skořápky, rašelina, ovocné pecky a další. Adsoprční vlastnosti aktivního uhlí určují velikost pórů. Například malá velikost pórů nezachytí velké molekuly adsorbátu a velké póry nemusí být schopny zadržet malé adsorbáty, ať už jsou nabité, polární molekuly nebo nenabité, nepolární sloučeniny. [27]

Materiály s větším obsahem ligninu (třešňové pecky) rozvíjí makroporézní strukturu, zatímco suroviny s vyšším obsahem celulózy (mandlové skořápky) poskytují u aktivního uhlí převážně mikroporézní strukturu. [27]

Aktivní uhlí je používáno pro odstranění NH_3-N. Dle provedené studie [18]lze dosáhnout 94–100% odstranění NH_3-N, a také 99, 99 % odstranění olova. V případě odstranění zákalu je úspěšnost mezi 59 až 85 %. Při odstranění dalších kontaminantů, jako je CHSK a TOC, byla účinnost mezi 22 až 27 %, podle další z řady provedených studií [28] a rovněž také účinnost odstraňování koliformních bakterií byly nízké, v rozmezí od 36 % do 59 %. Jak vyplývá z provedených studií, lze aktivní uhlí doporučit jako adsorbent k odstraňování kovů, amoniakového dusíku a zákalu. [15]

4 BIOCHAR

Biochar nebo také biouhel se vyrábí a používá už několik tisíc let a nejvíce známý je pod pojmem dřevěné uhlí. Přirozeně vzniká biochar při lesních požárech. Lidé si v minulosti všimli, že půda po požáru vykazuje lepší vlastnosti a výnosy pěstovaných plodin. Dalším vývojem se ukázalo, že biochar má kladný vliv na zdraví zvířat, a také nesporný dopad na životní prostřední. Biouhel je materiál bohatý na uhlík generovaný z uhlíkově neutrálních zdrojů. Vzhledem k tomu, že jde o ekologicky nezávadný prostředek pro úpravu půdy, nabízí také základní strategie pro zachycování a ukládání uhlíku. [29][30]

Způsoby využití biocharu jsou v současné době velmi rozmanité, ať už se jedná o použití při výrobě tepla a elektřiny nebo použití v hutnictví, zemědělství a chovu zvířat, jako stavební materiál nebo k lékařským účelům. Ve snaze snížit emise skleníkových plynů si v posledních letech získává stále větší popularitu jako náhrada za fosilní nosiče uhlíku. Biochar může být využit pro adsorpci oxidu uhličitého, sanaci půdy a odstranění znečištění ovzduší. [29][30]

4.1 VÝROBA BIOCHARU

K výrobě biocharu se používají termochemické metody. Mezi známé termochemické procesy patří pyrolýza a zplyňování. Jedním z hlavních cílů výroby biocharu je změna chemického složení ve srovnání se surovou biomasou, především zvýšení obsahu uhlíku. To je způsobeno oddělením funkčních skupin obsahujících kyslík a vodík. Proto zvýšení reakční teploty vede ke zvýšení obsahu uhlíku, přičemž má za následek nižší obsah vodíku a kyslíku. [29]

4.1.1 Pyrolýza

Biochar je pevným produktem pyrolýzy biomasy. Biomasa se většinou skládá ze tří organických sloučenin celulózy, hemicelulózy a ligninu. Protože tyto sloučeniny vykazují při tepelném zpracování odlišné reakce, ovlivňuje složení biomasy výtěžek a vlastnosti výsledného produktu. Pyrolýza je termochemický rozklad při zvýšených teplotách a bez přídavku vnějšího kyslíku. Proces začíná sušením biomasy, která je následně zahřívána. Poté se z pevné látky uvolňují těkavé látky. Těkavé sloučeniny

mohou tvořit trvalé plyny (např. oxid uhelnatý, methan) nebo kondenzovatelné organické sloučeniny (methanol a kyselina octová). [29]

Při rychlé pyrolýze se biomasa rychle zahřeje na požadovanou teplotu a vzniká kapalný produkt (tekutý olej). Aby se předešlo sekundárním reakcím, tak se plyny zhášejí. Výnos kapalné složky může dosáhnout až 75 % ze vstupní suroviny. [29]

Ve výrobě biouhlu je však hlavním zájmem získat pevný uhlíkatý produkt. Při pomalé pyrolýze jsou použity většinou teploty kolem 500 °C. Teplota závisí na požadovaných vlastnostech produktu. Pro dosažení vysokého obsahu uhlíku (více než 95 %) se používají teploty zpracování kolem 1000 °C, což je možné při použití dřevité biomasy. Pyrolýza v teplotním rozsahu mezi 200 a 300 °C se označuje jako torefakce. Podle pyrolýzní teploty použité při výrobě biocharu ho lze rozdělit na nízko-teplotní biochar, středně-teplotní a vysoko-teplotní biochar. Nízko – teplotní biochar je vyráběn při teplotě 400 °C, vyznačuje se malou stálostí v půdě, nízkým povrchem, nižším pH, vyšším výtěžkem a silnou hydrofobicitou. Středně – teplotní biochar nemá oproti nízko-teplotnímu ani vysoko–teplotnímu biocharu žádnou zásadní výhodu. Vysoko-teplotní biochar je vyráběn při teplotě 600 °C. Má dlouhodobou stálost v půdě, velký specifický povrch, vyšší pH a nižší hydrofobicitu.[29]

4.1.2 Zplyňování

Proces zplyňování má ve srovnání s jinými tepelnými procesy několik výhod jako je schopnost rozkládat materiál při menších objemech reaktoru, tvorbu malého množství kontaminantů a efektivnější využití vzniklého syntézního plynu. Na rozdíl od pyrolýzy pracuje bez potřeby vnějšího přísunu energie. Ve srovnání s jinými procesy je zplyňování dřevní biomasy považováno za jednu z nejvhodnějších možností pro optimalizaci účinnosti přeměny chemické energie paliva. Stechiometrická reakce dřevní biomasy s částečným množstvím kyslíku vede k tvorbě hořlavých produktových plynů, a tím ke zplyňování. Pro proces zplyňování existují různé typy reaktorů. Pevné ložové reaktory efektivně přeměňují biomasu na syntézní plyn a zároveň jsou vhodné pro produkci biocharu jako vedlejšího produktu s vysokým obsahem uhlíku (85–90 % hmotnosti).

Biomasa zaváděná do systému zplyňování prochází v reaktoru čtyřmi sekcemi a je přeměňována na syntézní plyn a biochar jako vedlejší produkt. V reaktoru biomasa prochází zónou sušení, pyrolýzy, redukce a oxidace. Množství vyprodukovaného biocharu závisí na typu biomasy a provozních podmínkách. Přibližně 10–20 % biomasy přiváděné do reaktoru je přeměněno na biochar. [31]

Využití syntézního plynu získaného termochemickou přeměnou biomasy jako obnovitelného zdroje energie představuje další výhodu, zatímco energetický potenciál biocharu jako vedlejšího produktu činí tyto systémy velmi atraktivními. Biochar vzniklý zplyňováním dřevní biomasy obsahuje převážně uhlík (asi 85 % hmotnosti), dále dusík, vodík, fosfor, vápník, hořčík a železo. [31]

4.2 VLASTNOSTI BIOCHARU

Vlastnosti biocharu jsou ovlivněny materiálem, z něhož byl biochar vyroben a také zvoleným výrobním procesem. Zatímco hustota biocharu se zvyšuje s teplotou zpracování, v případě objemové hmotnosti je tomu naopak. Velká plocha povrchu je charakteristická pro biochar vyrobený pyrolýzou. Co se týče objemu pórů, je také ovlivněn teplotou zpracování. [29]

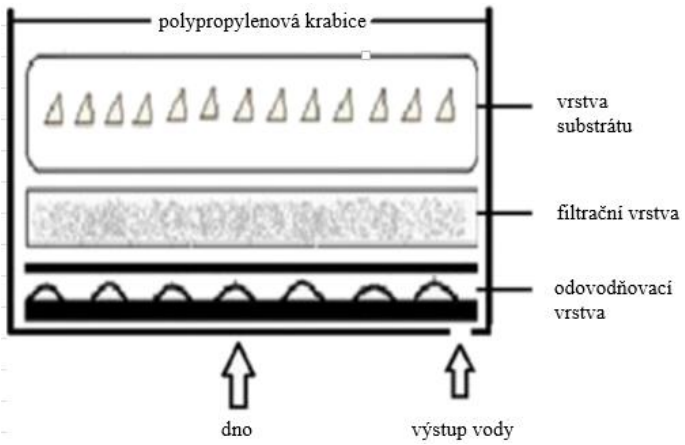
K dalším vlastnostem patří hydrofobnost, která je výsledkem povrchových funkčních skupin a také kapacita zadržování vody, jenž závisí na poréznosti hmotnostního objemu biouhlu. Tyto vlastnosti mohou mít protichůdné účinky nebo se jejich účinky mohou překrývat, a z tohoto důvodu je nelze v některých případech snadno odlišit. Manipulace, přeprava a skladování je ovlivněna jeho mechanickou stabilitou. V závislosti na typu a směru mechanického zatížení ji lze vyjádřit pomocí různých parametrů, například odolnost proti oděru, drobivosti, pevnost v tahu nebo tlaku. [29]

Biochar patří k hořlavým sypkým materiálům a je tak spojen s rizikem samozahřívání a samovznícení během skladování a přepravy. Exotermické reakce vedou ke zvýšení teploty a tepelný únik může způsobit samovznícení. Tento jev je spojen zejména se skladováním pevných paliv v hromadách nebo haldách, kde se vzniklé teplo nemůže rychle rozptýlit. Tento jev byl v minulosti pozorován i u biocharu.[29]

4.3 STUDIE O VYUŽITÍ BIOCHARU

Studie [32], která se zaměřila především na vliv zeleného střešního substrátu doplněného biouhlem na kvalitu vody a množství srážkového odtoku byla provedena od prosince 2015 do června 2016 ve městě Shijiazhuang v provincii Hebei v Číně. Experimentální místo se nacházelo na střeše Ústavu hydrogeologie a environmentální geologie v Čínské akademii geologických věd. Střecha byla ze všech stran obklopena vozovkami a stavebními pozemky. Tato oblast byla polosuchým kontinentálním monzunovým klimatem s průměrnou roční teplotou mezi 13, 3 až 15, 0 °C. Nejvíce srážek spadlo v období mezi červnem a srpnem, přičemž nejvyšší teploty byly zaznamenány mezi červencem a zářím.

Pro účel experimentu byly vyrobeny 2 druhy modulární zelené střechy. Substrátové komponenty zelené střechy 1 (komerční substrát) se skládaly z rašeliny, vermikulitu, perlitu a pilin v objemovém poměru 2:3:3:0. Substrátové komponenty zelené střechy 2 (substrát s biocharem) zahrnovali rašelinu, vermikulit, perlit, biouhel a piliny v poměru 2:3:3:1:0.Modulární zelené střechy byly zkonstruovány pomocí polypropylenové krabice (50x33x40 cm) jak je patrné z přiloženého obrázku č. 11 shora dolů s filtrační vrstvou, drenážní vrstvou a spodní deskou (která se skládala ze spodní části plastové krabice). Tloušťka vrstvy substrátu byla 10 cm.



Obrázek 11 Náčrt modulární zelené střechy [32]

K experimentu byl použit biouhel z kokosových skořápek vyrobený pyrolýzou při teplotě 600 °C. Experimenty se simulovanými srážkami byly provedeny pomocí samostatně vyvinutého simulovaného srážkového zařízení. Rám simulovaného srážkového zařízení byl umístěn na modulární zelenou střechu. Pro výpočet celkového objemu srážek byl použit průtokoměr. Průtokoměr rotoru a spínač kulového ventilu byly použity k nastavení průtoku a řízení simulované intenzity a rovnoměrnosti srážek. Šest dešťových potrubí bylo instalováno na dně simulovaného srážkového zařízení a bylo napojeno na vodovodní potrubí. Intenzita srážek byla stanovena na 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 a 80 mm. Poté co zelená střecha začala produkovat odtok, byly odebrány vzorky o objemu 1 l, doba intervalu vzorkování činila 5 až 10 min, dokud neustál odtok ze zelené střechy. Parametry monitorování odtoku zahrnovaly pH, EC, TN, TP, CHSK, TSS, olovo, měď a železo a k jejich analýze sloužil přenosný měřič. Následně byla provedena analýza dat (byly provedeny výpočty míry retence odtoku a zatížení znečisťující látkou).

Co se týče retence odtoku výsledky ukázaly, že míra retence odtoku zelené střechy 1 (komerční substrát) se pohybovala od 33, 6 % do 100 %, s průměrnou mírou retence 72 %, u zelené střechy 2 (biochar substrát) se míra retence odtoku pohybovala od 33, 2 do 100 %, s průměrnou mírou retence 72, 08 %. Z těchto výsledků tedy vyplývá, že nebyly zaznamenány žádné významné rozdíly v průměrné míře retence odtoku mezi dvěma substráty. Výsledkem tedy je, že biochar neměl významný účinek na retenci odtoku.Vzhledem k 10, 20 a 30 mm simulovaným srážkám nebyl vyvolán odtok, a koncentrace olova a mědi v odtoku zelené střechy na všechny simulované srážky byla pod detekčním limitem. Nebyly nalezeny žádné významné rozdíly v pH a koncentraci EC, TN, CHSK, TP, TSS a železa (dále jen Fe) v odtoku dvou druhů substrátů. PH a koncentrace TP však byly vyšší v odtoku biouhlového substrátu než v komerčním substrátu. EC, TN, CHSK, TSS a Fe byly nižší v odtoku biouhlového substrátu než v komerčním substrátu. Koncentrace TN a CHSK v odtoku komerčního substrátu však byla téměř dvakrát vyšší než v odtoku biouhelného substrátu. Kromě toho po 40–50 mm simulovaných srážkových událostech koncentrace CHSK v odtoku biouhlového substrátu splnila třídu V. Národního standardu kvality povrchových vod. Podobně se koncentrace TN blížila třídě V. Národního standardu kvality povrchových vod. Substrát s biouhlem účinně snižoval koncentraci TN a CHSK v odtoku zelené střechy.

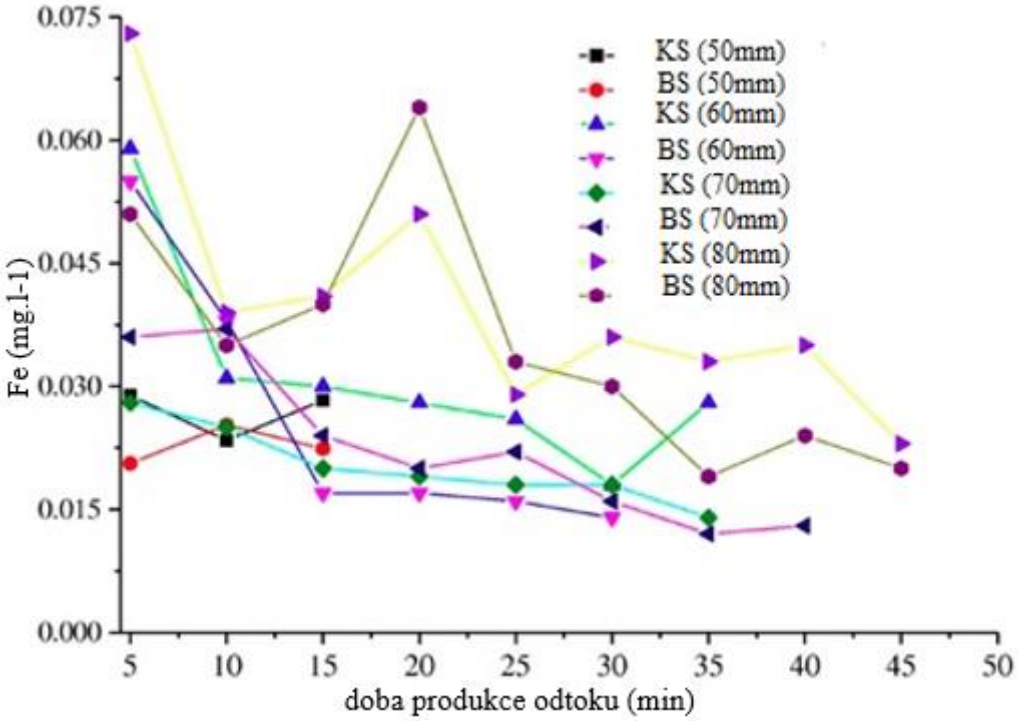
Analýza vzorků je zpracována v následující tabulce, ve které jsou vždy uvedeny hodnoty pH a koncentrací EC, TN, CHSK, TP, TSS, Fe pro střechu 1 s komerčním substrátem a střechu 2 se substrátem s přídavkem biocharu. Hodnoty jsou rozděleny podle množství srážek.

Tabulka 3 Analýza vzorků [32]

Dešťové srážky (mm)		**pH**	**EC**	**TN**	**CHSK**	**TP**	**TSS**	**Fe**
			($\mu S \cdot cm^{-1}$)	**($mg \cdot l^{-1}$)**	**($mg \cdot l^{-1}$)**	**($mg \cdot l^{-1}$)**	**($mg \cdot l^{-1}$)**	**($mg \cdot l^{-1}$)**
40	Střecha 1	6.18	925.00	32.62	453.61	0.26	6.00	0.29
	Střecha 2	6.75	901.00	29.38	359.26	0.41	7.00	0.21
50	Střecha 1	6.03	901.27	24.86	219.53	0.19	3.04	0.26
	Střecha 2	6.57	736.74	12.10	85.95	0.28	2.37	0.23
60	Střecha 1	6.88	714.13	12.55	94.00	0.08	5.19	0.03
	Střecha 2	7.62	553.72	3.24	23.74	0.08	6.33	0.03
70	Střecha 1	7.07	500.70	5.40	54.55	0.09	11.66	0.02
	Střecha 2	7.85	413.34	2.23	1.50	0.13	7.15	0.02
80	Střecha 1	7.22	511.25	5.28	37.29	0.12	11.08	0.04
	Střecha 2	7.83	500.09	2.31	16.12	0.14	9.42	0.03
Střední hodnota	Střecha 1	6.68	710.47	16.14	171.79	0.15	7.39	0.13
	Střecha 2	7.32	620.98	9.85	97.31	0.21	6.45	0.01

Z analýzy vzorků je zřejmé, že koncentrace Fe se s trváním srážek postupně snižovala. Kromě toho nebyly žádné významné rozdíly mezi koncentrací Fe v komerčním substrátu a substrátu s biouhlem.

Výsledkem tedy je, že substrát s biocharem nedokázal snížit koncentraci Fe v odtoku. Tento fakt je patrný z hodnot na obrázku 12. Hodnoty jsou uvedeny pro komerční substrát (KS) a substrát s biocharem (BS) a to podle množství srážek 50, 60, 70 a 80 mm.



Obrázek 12 Množství železa v závislosti na době produkce odtoku [32]

Z této studie vyplynulo, že mezi komerčním substrátem a substrátem biouhlu nebyly žádné významné rozdíly v průměrných rychlostech zadržování odtoku. Substrát s biouhlem vykazoval lepší schopnost neutralizovat pH než komerční substrát. Koncentrace a znečištění TN a CHSK v odtoku substrátu biouhlu byly výrazně nižší než v komerčním substrátu. Substrát biouhlu však nedokázal snížit koncentraci TP, Fe a TSS v odtoku zelené střechy.

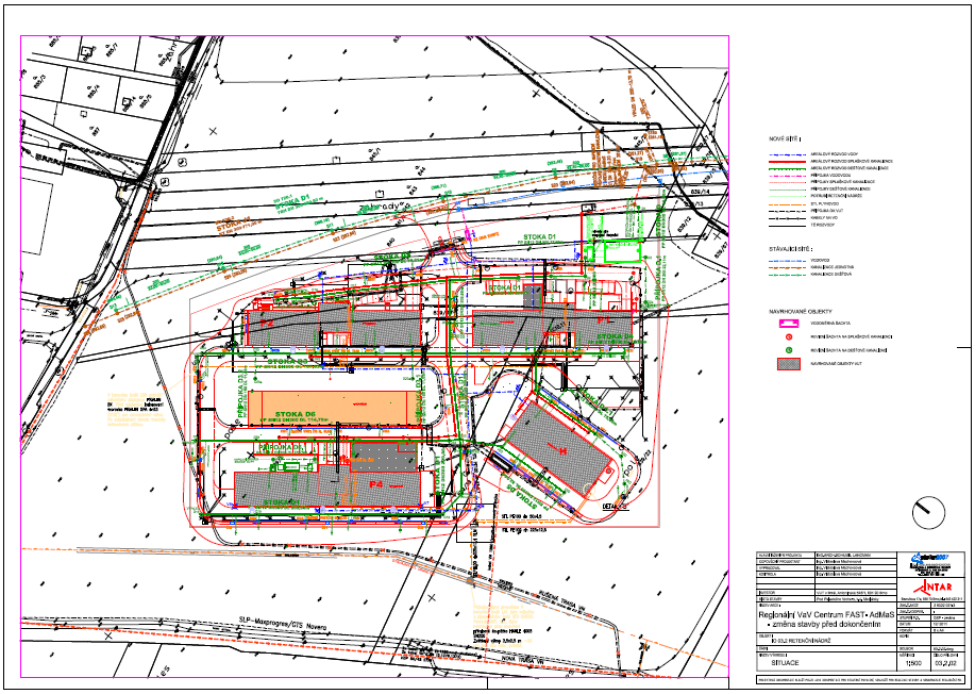
Tato studie dokazuje, že přidání biouhlu do substrátu použitého u zelených střech zlepšujeme kvalitu dešťové vody v odtoku.

5. ADSORPČNÍ TESTY BIOCHARU V CENTRU ADMAS

Tato část je zaměřena na praktickou část bakalářské práce, jejímž cílem je testování, resp. ověření účinnosti adsorpčních schopností biocharu. Testované vzorky biocharu, dešťové vody a potřebné technické zařízení bylo poskytnuto výzkumným centrem AdMaS. Vyhodnocení vzorků bylo provedeno laboratoří městského inženýrství centra AdMaS

5.1 CÍL VÝZKUMU

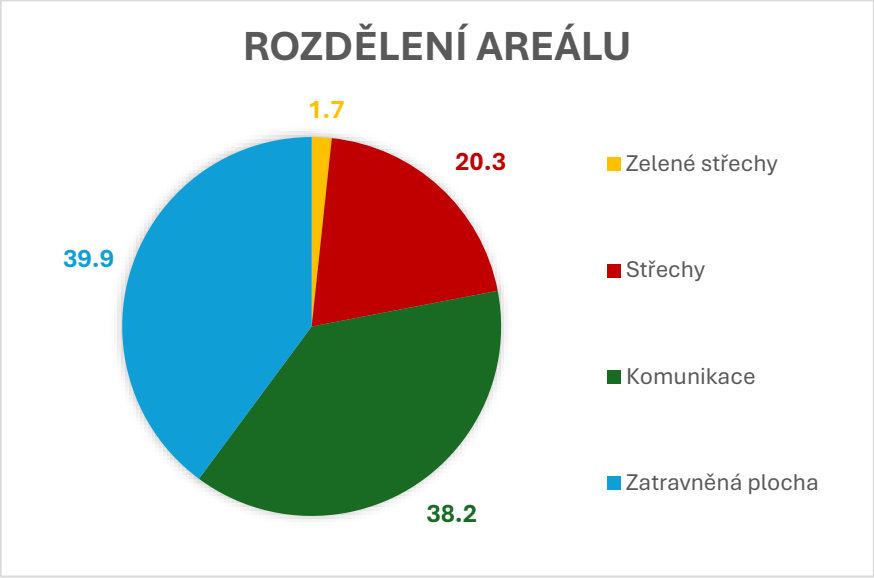
Hlavním cílem experimentu bylo zjistit účinnost biocharu jako adsorbentu a jeho schopnosti snížit koncentrace organických a anorganických látek obsažených v dešťové vodě ze zelených střech a také vlivu na hodnoty pH dešťové vody. Dalším krokem potom bylo posoudit kvalitu této vody a její vhodnosti k dalšímu využití analogicky dle ČSN 75 7143. K experimentu byl použit jako filtrační materiál biochar vyrobený technologií středněteplotní pyrolýzy z otrub, přes který byla přefiltrována dešťová voda. Pro účely tohoto výzkumu byl zvolen areál výzkumného centra AdMaS, vzhledem k tomu, že se zde nachází zpevněné nepropustné plochy, konvenční a zelené střechy. Na obrázku 13 je situace výzkumného centra AdMaS.



Obrázek 13 Situace výzkumného centra AdMaS

Zelené střechy jsou umístěny na terasách budov P1 a P4 (obrázek 14) a jejich celková plocha je 306 $m^{2.}$ Na obrázku 15 je výsečový graf znázorňující rozdělení ploch v areálu výzkumného centra AdMaS v procentech.

Obrázek 14 Zelená střecha na terase budovy P4



Obrázek 15 Rozdělení ploch areálu v procentech

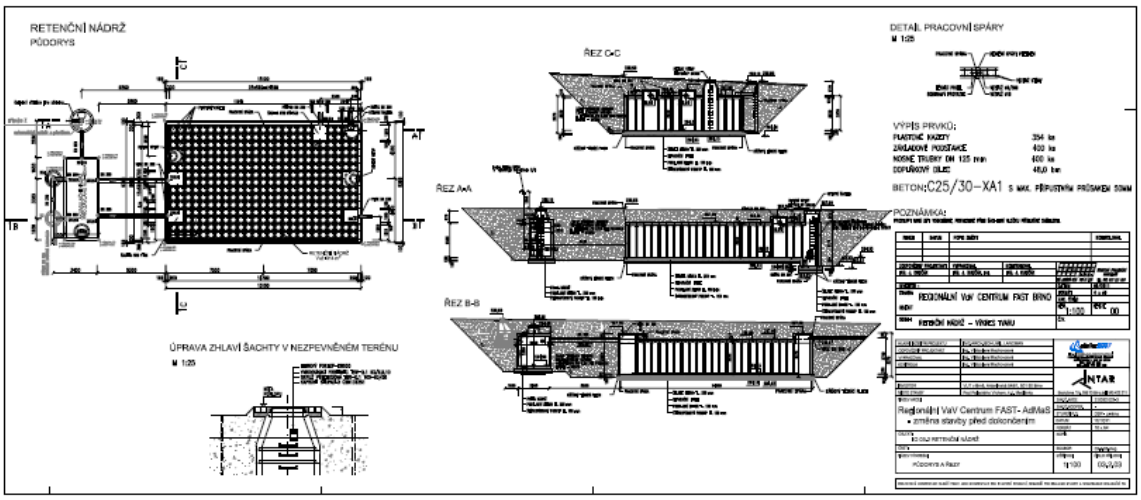
Zbývající střechy jsou ploché střechy z ošetřených kovových části, komunikace a parkoviště, které jsou využívány pouze pro potřeby areálu a zatravněné plochy. Všechny tyto plochy lze dle normy TNV 75 9011, týkající se hospodaření se srážkovými vodami, zařadit dle orientační klasifikace znečištění srážkových vod z hlediska znečištění

nerozpuštěnými látkami, těžkými kovy a uhlovodíky mezi plochy u kterých je míra znečištění nízká. Kvalita dešťové vody z akumulace z celého areálu je tedy srovnatelná s kvalitou dešťové vody ze zelených střech.

Dešťová voda v centru AdMaS je odváděna do akumulační nádrže. Jedná se železobetonovou prefabrikovanou nádrž o objemu 30 m^3. Vstup do nádrže je zabezpečen železobetonovými skružemi, přechodovým konusem a pokopem typu D a stupadly se žebříkem. Voda z této akumulační nádrže (obrázek 16) je určena pro závlahu zelených ploch před hlavním vstupem do areálu.

Obrázek 16 Akumulační nádrž

Přebytečná dešťová voda je pak odváděna do retenční nádrže a odtokovým potrubím zaústěno do šachty, jenž je součástí jednotné kanalizace. Retenční nádrž (obrázek 16 – půdorys retenční nádrže) je provedena jako podzemní monolitická železobetonová zastropená jímka s vnějšími půdorysnými rozměry 15,1 x 9,3 m. Objem retenční nádrže je 314 m3. Nádrž je řešena jako jednokomorová jímka. Pro přítok do nádrže jsou provedeny tři otvory jeden o DN200 mm ostatní dva o průměru 300 mm. Jako bezpečnostní přepad slouží jeden otvor DN300 mm. m. Odtokové potrubí a bezpečnostní přepad DN 300 je zaústěno do šachty S1. Šachta S1 je součástí přípojky jednotné kanalizace.



Obrázek 17 Půdorys retenční nádrže

5.2 ADSORPČNÍ MATERIÁL

Jako adsorpční materiál k tomuto experimentu byl využit biochar vyrobený z otrub (obrázek 18). Byly použity dva filtrační materiály. První materiál (neaktiovaný) byl vyroben pomocí pyrolýzy při 300 °C v pyrolýzní jednotce (obrázek 19).

Druhý materiál (aktivovaný) byl také vyroben pyrolýzou při teplotě 300 °C v pyrolýzní jednotce. Dále byl aktivován pomocí 4M roztoku NaOH a to formou louhování (máčení) po dobu 24 hodin. Po skončení louhování byl materiál vyjmut z lázně a dán opět do pyrolýzní jednotky. V pyrolýzní jednotce byl aktivován, a to při teplotě 700 °C. Po zchlazení materiálu proběhlo jeho promývání vodou. Bylo tak dosaženo zpětného snížení pH a také odstranění reziduí dané látky. Aktivace materiálu se prováděla za účelem zvýšení měrného povrchu (S_{BET}), která činila u aktivovaného materiálu 40,52 m^2/g a u neaktivovaného materiálu 28,34 m^2/g. Na obrázku 20 je výsledný produkt biochar.

Obrázek 18 Peletizované surové otruby

Obrázek 19 Pyrolýzní jednotka

Obrázek 20 Peletizované pyrolyzované otruby, biochar

5.3 POSTUP EXPERIMENTU

Experiment začínal odběrem dešťové vody z akumulační nádrže, ze které byl odebrán s odstupem několika dní vždy vzorek o objemu 1 m^3. Celkem bylo odebráno 6 vzorků do připravených IBC nádrží.

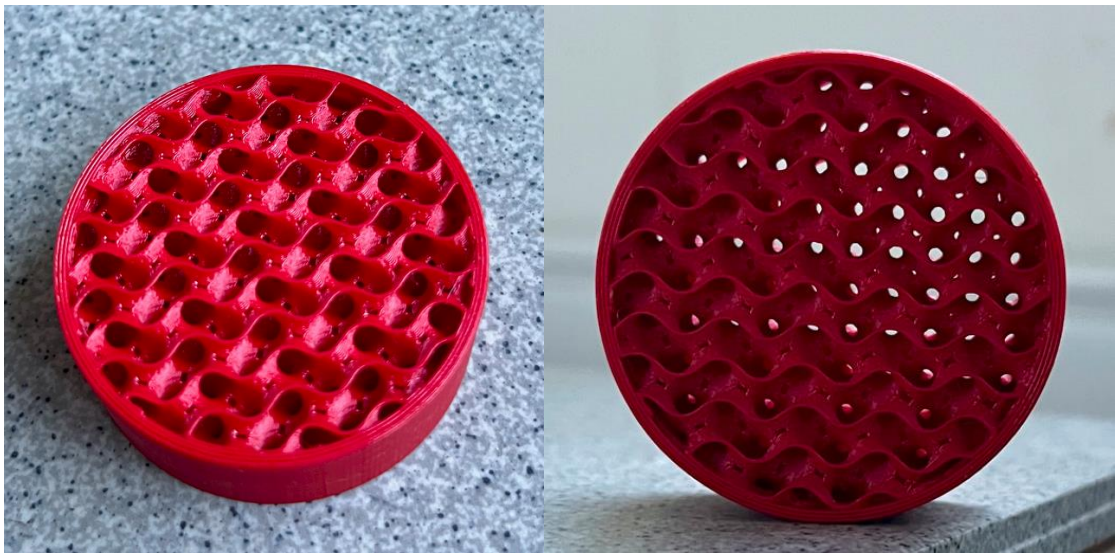
5.3.1 Skladba filtračního zařízení

Filtrační zařízení (obrázek 21) pomocí kterého byl výzkum prováděn, se skládalo z IBC nádrže na dešťovou vodou, čerpadla, menší nádrže s bezpečnostním přelivem a potrubí o průměru 5 cm a vnitřním průměru 4,8 cm s uzávěry připevněného ke stojanu a dále nádob na přefiltrovanou vodu.

Obrázek 21 Filtrační zařízení

Aby nedošlo ke ztrátě sypkého filtračního materiálu z kolony, tak byla v její spodní části umístěna propustná zátka z PVC (obrázek 22), která byla vyrobena pomocí 3D tisku na stavební fakultě VUT v Brně. Filtrační materiál byl nejdříve proset pře síto a byla z něj oddělena jemná frakce. K experimentu byla použitá hrubá frakce. Samotná výška filtrační náplně biocharu byla volena 75 cm. Nejdříve proběhlo praní filtračního materiálu. Došlo ke smáčení náplně a tzv. zapracování filtru ve směru v němž probíhala samotná filtrace. Proprání trvalo několik minut, dokud z kolony nevytékala čistá voda. Po vypraní filtru zůstala kolona s filtračním materiálem napuštěna vodou, dokud nebyl započat samotný pokus. Před začátkem filtrace byly ještě odebrány vzorky surové vody, aby mohly být vyhodnoceny její parametry, které byly monitorovány v rámci výzkumu. Pak bylo započato se samotnou filtrací. Po skončení každého cyklu filtrace (stejně to probíhalo s každou jednotlivou IBC nádrží) byl odebrán vzorek o objemu 1000 ml filtrovaný neaktivním biocharem a vzorek o objemu 1000 ml filtrovaný aktivovaným biocharem Postupně tedy bylo odebráno 6 vzorků filtrovaných aktivovaným biocharem a 6 vzorků filtrovaných neaktivovaným biocharem ze 6 IBC nádrží. Vzorky byly

odebrány po průtoku 0,34 l/min, aby IBC nádrž vystačila na 24 hodinový provoz. Odběr vzorků byl proveden skleněnou odměrnou nádobou. Vzorky byly dále uskladněny v lednici. Nakonec byly vzorky v pevně uzavřených lahvích přemístěny do laboratoře výzkumného centra AdMaS a bylo provedeno jejich vyhodnocení. Rozbory byly provedeny v horizontu 24 hodin kvůli zachování čerstvosti vzorku.



Obrázek 22 Zátka vyrobená 3D tiskárnou

5.4 VÝSLEDKY CHEMICKÉHO ROZBORU

Parametry monitorování odtoku zahrnovaly pH, biochemickou spotřebu kyslíku (BSK_5), chemickou spotřebu kyslíku (CHSK), celkový dusík (TN), celkový fosfor (TP), celkový uhlík (TC), celkový organický uhlík (TOC) a anorganický uhlík (IC). V tabulce č. 4 jsou výsledky chemického rozboru u těchto parametrů, vzorky před filtrací jsou označeny jako AdMaS1 až AdMaS6, vzorky filtrované přes aktivovaný biochar jako OT_A_1 až OT_A_6 a vzorky filtrované přes neaktivovaný biochar jako OT_N_1 až OT_N_6. V tabulce č. 5 je vyhodnoceno jaké účinnost bylo u monitorovaných parametrů u jednotlivých vzorků dosaženo, kladné hodnoty účinnosti jsou u vzorků, u kterých se koncentrace snížila a záporné pak u vzorků u nichž došlo naopak ke zvýšení koncentrace.

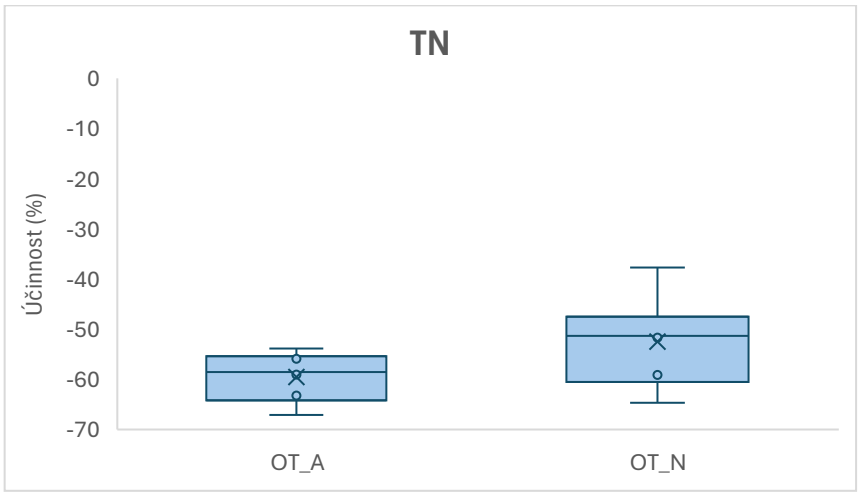
Tabulka 4 Výsledky chemického rozboru

Parametr	pH	BSK5	CHSK	TN	TP	TC	TOC	IC
Jednotka	[-]	[mg·l−1]	[mg·l−1]	[mg·l−1]	[mg·l−1]	[mg·l−1]	[mg·l−1]	[mg·l−1]
AdMaS 1	7.67	25.84	54.71	7.14	1.15	64.58	7.36	57.22
OT_A_1	9.09	34.32	87.45	2.35	0.41	67.19	7.73	59.46
OT_N_1	8.14	36.14	108.12	3.45	1.25	65.54	9.53	56.01
AdMaS 2	7.52	30.45	69.44	9.06	1.05	63.17	5.11	58.06
OT_A_2	9.41	38.47	100.78	3.71	0.55	72.44	11.65	60.79
OT_N_2	8.44	41.37	114.01	4.46	1.62	66.12	6.81	59.31
AdMaS 3	7.37	15.47	52.12	8.32	0.97	59.78	4.22	55.56
OT_A_3	9.87	24.04	79.03	3.67	0.44	68.69	11.12	57.57
OT_N_3	8.21	24.17	97.82	2.94	1.48	60.34	8.21	52.13
AdMaS 4	7.55	51.44	134.48	9.25	1.07	60.12	4.71	55.41
OT_A_4	9.07	64.66	159.67	3.88	0.59	64.25	10.82	53.43
OT_N_4	8.32	65.30	190.32	3.78	1.88	62.04	10.68	51.36
AdMaS 5	7.31	44.14	74.12	8.43	0.91	58.10	3.80	54.30
OT_A_5	9.64	52.25	97.08	3.10	0.51	65.59	8.22	57.37
OT_N_5	8.40	57.44	121.34	4.13	1.54	60.34	9.17	51.17
AdMaS 6	7.74	47.68	114.55	7.37	1.21	54.30	4.91	49.39
OT_A_6	9.88	55.22	149.37	3.40	0.43	62.66	11.18	51.48
OT_N_6	8.82	60.71	161.18	4.59	1.49	60.19	9.44	50.75

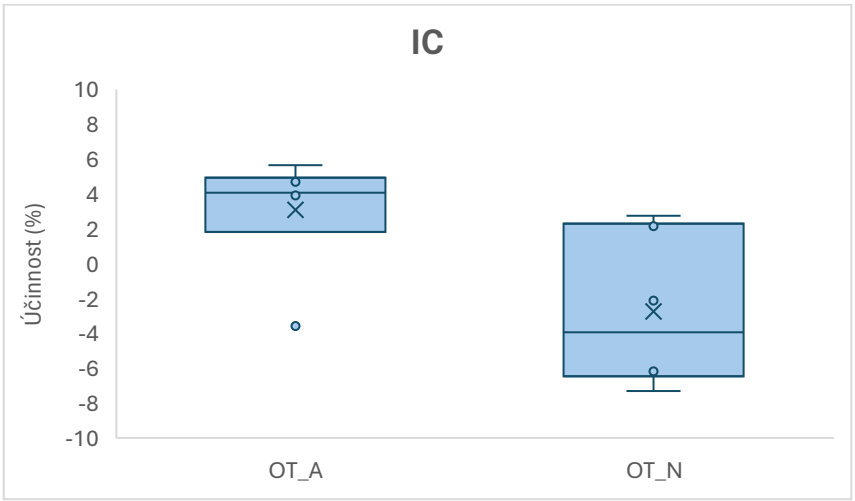
Tabulka 5 Účinnost v procentech

Vzorek	Účinnosti v procentech						
	BSK5	CHSK	TN	TP	TC	TOC	IC
OT_A_1	-32.82	-59.84	67.09	64.35	-4.04	-5.03	-3.91
OT_N_1	-39.86	-97.62	51.68	-8.70	-1.49	-29.48	2.11
OT_A_2	-26.34	-45.13	59.05	47.62	-14.67	-127.98	-4.70
OT_N_2	-35.86	-64.18	50.77	-54.29	-4.67	-33.27	-2.15
OT_A_3	-55.40	-51.63	55.89	54.64	-14.90	-163.51	-3.62
OT_N_3	-56.24	-87.68	64.66	-52.58	-0.94	-94.55	6.17
OT_A_4	-25.70	-18.73	58.05	44.86	-6.87	-129.72	3.57
OT_N_4	-26.94	-41.52	59.14	-75.70	-3.19	-126.75	7.31
OT_A_5	-18.37	-30.98	63.23	43.96	-12.89	-116.32	-5.65
OT_N_5	-30.13	-63.71	51.01	-69.23	-3.86	-141.32	5.76
OT_A_6	-15.81	-30.40	53.87	64.46	-15.40	-127.70	-4.23
OT_N_6	-27.33	-40.71	37.72	-23.14	-10.85	-92.26	-2.75
	Průměr účinnosti						
OT_A	-29.07	-39.45	59.53	53.31	-11.46	-111.71	-3.09
OT_N	-36.06	-65.90	52.50	-47.27	-4.16	-86.27	2.74

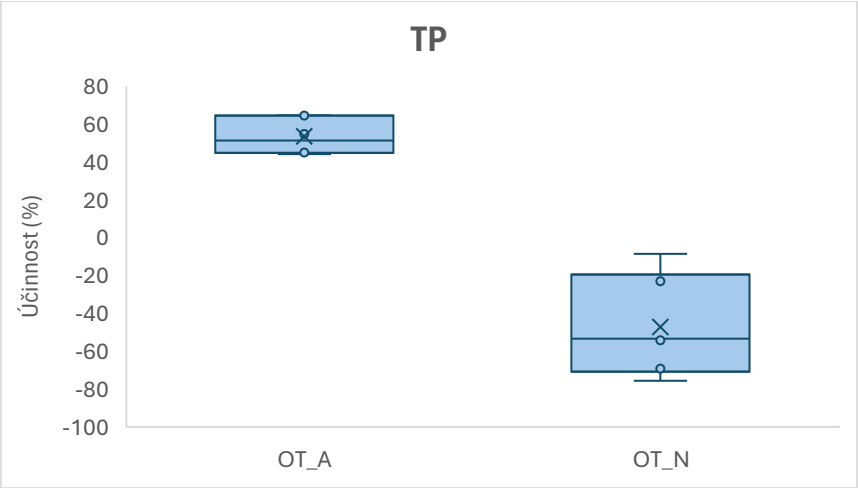
Účinnost parametrů TN, IC a TP je také graficky znázorněna na obrázku č. 23, 24 a 25.



Obrázek 23 Graf účinnosti TN



Obrázek 24 Graf účinnosti IC



Obrázek 25 Graf účinnosti TP

5.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Z výsledků chemického rozboru je patrné, že se u všech vzorků zvýšilo jejich pH, voda se stala zásaditější. Průměrná hodnota pH vody před filtrací byla 7,53, u vzorků filtrovaných aktivovaným biocharem došlo v průměru ke zvýšení o 1,97 a u vzorků filtrovaných neaktivovaným v průměru ke zvýšení o 0,86. Vzorky 1 až 5 filtrované neaktivovaným biocharem dosahovaly hodnoty pH, které lze dle normy ČSN 75 7143, týkající se jakosti vody pro závlahu zařadit do I třídy-voda vhodná k závlaze (hodnoty pH 5 až 8,5). Pouze u vzorku 6 filtrovaného neaktivovaným biocharem hodnota pH činila 8,82 a dle uvedené normy ji přísluší třída II.- voda podmíněně vhodná k závlaze. Všechny vzorky 1 až 6 filtrované aktivovaným biocharem však přesáhly hraniční hodnotu pH 9 a proto se zařadily do III třídy-voda nevhodná k závlaze. Z výzkumu je zřejmé, že biochar má schopnost neutralizovat pH a má tedy svůj potenciál v řešení problematiky kyselých dešťů.

U dalších parametrů BSK_5, CHSK, TC, TOC došlo ke zvýšení jejich koncentrace ve všech vzorcích. V případě vzorků filtrovaných aktivovaným biocharem, byly tyto hodnoty nižší než u vzorků s neaktivovaným biocharem.

V případě monitorovaného parametru TN způsobil biochar snížení koncentrace celkového dusíku ve všech vzorcích. U vzorků 3 a 4 filtrovaného neaktivovaným biocharem dosahovala koncentrace nižších hodnot než s aktivovaným biocharem.

U ostatních vzorků však byla koncentrace celkového dusíku nižší u vzorků s aktivovaným biocharem.

U parametru TP se koncentrace fosforu snížila u všech vzorků filtrovaných aktivovaným biocharem. U vzorků filtrovaných neaktivovaným biocharem se naopak koncentrace fosforu zvýšila. Co se týče parametru IC tak u vzorků 4 bylo dosaženo snížení koncentrace u vzorku filtrovaného aktivovaným biocharem i neaktivovaným biocharem. U vzorků 1,3,5 se koncentrace snížila pouze u vzorku filtrovaných neaktivovaným biocharem. U zbývajících vzorků se koncentrace zvýšila.

Podle normy ČSN 75 7143 koncentrace rozpuštěných látek ve všech monitorovaných vzorcích nepřesáhla mezní hodnotu 800 $mg\text{-}l^{-1}$ a všechny vzorky tak spadají do I třídy jakosti-voda vhodná pro závlahy.

Z tohoto výzkumu vyplynulo, že dešťová voda filtrovaná aktivovaným i neaktivovaným biocharem splňuje požadavky na vodu vhodnou pro závlahy a to dle výše uvedené normy, jenž upravuje parametry jakosti vody pro závlahu.

Tento výzkum také ukázal, že i když se biochar ukazuje jako univerzální adsorbent jeho, schopnost adsorbovat anorganické látky a organické látky ve vodném prostředí je ovlivněna jeho fyzikálně-chemickými vlastnostmi. Jedná se hlavně o velikost povrchu, jeho pórovitost. Tyto vlastnosti ovlivňuje použitá výchozí biomasa, teplota a délka pyrolýzy, pH roztoku, ve kterém probíhá adsorpce. Dále pak jeho dávkování jako adsorbentu, koexistence kationtů, teplota.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout problematiku hospodaření s dešťovými vodami se zaměřením na zelené střechy a stěny a odstraňování znečištění z odtékajících vod adsorpcí. V praktické části bakalářské práce pak provést filtrační testy dešťové vody ze zelených střech a stěn s použitím biocharu.

Dostupné studie prokázaly, že nejvíce efektivním principem čištění dešťových vod ze zelených střech je princip adsorpce-filtrace, pomocí něhož bylo dosaženo nejlepší účinnosti odstranění sledovaných parametrů, které se používají pro vyhodnocení kvality u dešťové vody.

Ze studií, které se zabývaly v současnosti používanými adsorbenty jako je aktivní uhlí, zeolit nebo biochar vyplynulo, že přidáním těchto adsorbentů do substrátu použitých u zelených střech, ve srovnání s komerčními substráty, se dosahuje snížení koncentrace rozpuštěných látek a zvýšení pH. Substráty s těmito adsorbenty byly také schopné adsorbovat kovy. Závěrem těchto studií je, že zelené střechy mají potenciál ve zlepšení kvality dešťové vody a jsou tedy vhodným řešením v hospodaření s dešťovými vodami a podílejí se rovněž na zmírnění dopadů kyselých dešťů. Nutností je však výběr vhodně zvoleného substrátu s přidáním adsorbentu s co nejlepšími adsorpčními schopnostmi.

Výsledky provedeného experimentu ve výzkumném centru AdMaS v rámci praktické části bakalářské práce ukázaly, že biochar vykazoval schopnost snížit koncentraci anorganických a organických látek rozpuštěných v dešťové vodě pouze u některých sledovaných parametrů, u některých parametrů došlo naopak ke zvýšení koncentrace. Tento výsledek byl zřejmě ovlivněn použitou biomasou k výrobě biocharu, ale také teplotou a délkou pyrolýzy, množstvím použitého adsorbentu. Výsledky experimentu také potvrdily schopnost biocharu neutralizovat pH. Všechny testované vzorky však podle platné normy nepřesáhly mezní hodnotu koncentrací rozpuštěných látek pro I třídu jakosti – vody vhodné pro závlahy.

LITERATURA

[1] Prof. Ing. HLAVÍNEK PETR CSc., MBA, 2007. *Hospodaření s dešťovými vodami v urbanizovaném územní*. Brno: ARDEC. ISBN 80-86020-55-X

[2] ČERMÁKOVÁ Barbora a MUŽÍKOVÁ Radka, 2009. *Ozelenělé střechy*. Praha: GRADA. ISBN 978-80-247-1802-6.

[3] DRABINOVÁ, PH.D., Ing. Silvie. *Využití srážkových vod* [online]. In:[cit. 2025-03-10]. Dostupné z: http://zasobovanivodou.vsb.cz/

[4] MANSO, Maria, Inês TEOTÓNIO, Cristina Matos SILVA a Carlos Oliveira CRUZ, 2021. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (135) [cit. 2025-03-10]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111

[5] VIJAYARAGHAVAN, K., 2016. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (57), 740-752 [cit. 2025-03-15]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119

[6] BERNDTSSON, Justyna Czemiel, 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* [online]. (4), 351-360 [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014

[7] VIJAYARAGHAVAN, K. a Umid Man JOSHI, 2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution* [online]. (194), 121-129 [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021

[8] CHEN, Chi-Feng, 2013. Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering* [online]. (52), 51-58 [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.083

[9] DOSTÁLOVÁ, Jitka, 2021. *Zelené střechy*. Praha: GRADA. ISBN 978-80-271-1326-2

[10] EKOVESNICE.CZ, 2024. *Zelené střechy jako součást ekologického hospodaření s dešťovou vodou* [online]. 17.1.2024 [cit. 2025-03-16]. Dostupné z: https://ekovesnice.cz/340-zelene-strechy-jako-soucast-ekologickeho-hospodareni-s-destovou-vodou.htm

[11] HANDLEY S. PAULEIT, J.F., S.E. GILL, A.R. ENNOS a S. PAULEIT, 2007. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment* [online]. (1), 115-133 [cit. 2025-03-15]. Dostupné z: https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115

[12] ROSS W.F. CAMERON, JANE E. TAYLOR a MARTIN R. EMMETT, 2014. What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment* [online]. (73), 198-207 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005

[13] MANSO, Maria a João CASTRO-GOMES, 2015. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (41), 863-871 [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203

[14] YSEBAERT, Tess, Kyra KOCH, Roeland SAMSON a Siegfried DENYS, 2021. Green walls for mitigating urban particulate matter pollution—A review. *Urban Forestry & Urban Greening* [online]. (59) [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127014

[15] MORALES-FIGUEROA, C., CASTILLO-SUÁREZ, L. A., LINARES-HERNÁNDEZ, I., MARTÍNEZ-MIRANDA, V. a TEUTLI-SEQUEIRA, E. A., 2023. Treatment processes and analysis of rainwater quality for human use and consumption regulations, treatment systems and quality of rainwater. In: J. ENVIRON. SCI. TECHNOL. 20. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. s. 9369-9392 [cit. 2025-03-16]. ISSN 1735-2620. Dostupné z: https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1007/s13762-023-04802-2

[16] *Hospodaření se srážkovými vodami TNV 75-9011*, 2013. Online. In: Gov.cz. Dostupné z: https://mze.gov.cz/public/portal/-q363041---QOCSTmOG/tnv-75-9011-hospodareni-se-srazkovymi. [cit. 2025-03-16] 10

[17] METCALF & EDDY, INC. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill Higher Education, 2013. ISBN 9780077441210

[18] SHAHEED, Riffat, Wan Hanna Melini MOHTAR a Ahmed EL-SHAFIE, 2017. Ensuring water security by utilizing roof-harvested rainwater and lake water treated with a low-cost integrated adsorption-filtration system. *Water Science and Engineering* [online]. (10), 115-124 [cit. 2025-03-20]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.05.002

[19] AZAMBUJA, Teixeira Celimar a Ghisi ENEDIR, 2019. Comparative Analysis of Granular and Membrane Filters for Rainwater Treatment. *Water* [online]. (5) [cit. 2025-03-25]. Dostupné z: doi:10.3390/ma12101616

[20] STRUK-SOKOŁOWSKA, Joanna, Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR, Piotr JADWISZCZAK a AT. ALL, 2020. The Quality of Stored Rainwater for Washing Purposes. *Water* [online]. (1) [cit. 2025-03-30]. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/w12010252

[21] ROWE, D. Bradley. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* [online]. 2011(8,9), 2100-2110 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029

[22] SHAFIQUE, Mohamed, Reeho KIM a Mohamed RAFIQ. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018(90), 757-773 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006

[23] YULISTYORINI, Anie, Gilang IDFI a Evy Dw FAHMI, 2018. Enhanced rooftop rainwater harvesting quality through filtration using zeolite and activated carbon. *MATEC Web of Conferences 204* [online]. (03016) [cit. 2025-03-30]. Dostupné z: https://doi.org/10.1051/matecconf/201820403016

[24] VIJAYARAGHAVAN, K. a Umid Man JOSHI, 2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution* [online]. (194), 121-129 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021

[25] KREJČÍ, DR.SC., Ing. Vladimír. *Odvodnění urbanizovaných území-koncepční přístup*. Brno: NOEL, 2000. ISBN 80-86020-39-8. ISSN 1801-8033

[26] PETRICIOLET, Adrián Bonilla, Didilia Ileana MENDOZA-CASTILLO a Hilda Elizabeth REYNEL-ÁVILA. *Adsorption Processes for Water Treatment and Purification*. Springer Cham, 2018. ISBN 978-3-319-86330-6

[27] IOANNIDOU, O. a A. ZABANIOTOU, 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (9), 1966-2005 [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: https://doi.org/10.106/j.rser.2006.03.013

[28] NADDEO, Vincenzo, Davide SCANNAPIECO a Vincenzo BELGIORNO, 2013. Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. *Journal of Hydrology* [online]. (498), 287-291 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: https://doi.or/10.1016/j.jhydrol.2013.06.012

[29] WEBER, Kathrin a Peter QUICKER, 2018. Properties of biochar. *Fuel* [online]. (217), 240-261 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

[30] LEE, Jechan, Eilhann E. KWON a Ki-Hyun KIM, 2017. Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (77), 70-79 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.002

[31] AHMET, Erdem a Dogru MURAT, 2021. Process Intensification: Activated Carbon Production from Biochar Produced by Gasification: Highly porous carbon substances with low production costs. *Johnson Matthey Technology Review* [online]. (3), 352-365 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: DOI:10.1595/205651320x15899664199207

[32] WANG LONG, Wang, Miao LIPING, Wanh HUIWEI a Zhang QIANQIAN, 2019. Analysis of the effect of green roof substrate amended with biochar on water quality and quantity of rainfall runoff. *Environ Monit Assess* [online]. (304) [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10661-019-7466-4

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

AdMaS-Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie (Advanced Materials, Structures and Technologies)

USA-Spojené státy americké

RWS-RegenWasserSpeicher (v překladu zásobárna dešťové vody).

PVC-U-polyvinylchlorid

NTU-nefelometrická zákalová jednotka

CHSK-chemická spotřeba kyslíku

TDS-celkové množství látek rozpuštěných ve vodě nebo vodním roztoku

BSK_5-biochemická spotřeba kyslíku

F/D-filtrace/dezinfekce

Cl-chlorace

F/UV-filtrace/UV

A/F-adsorpce/filtrace

S. D-solární dezinfkce

$KMnO_4$-manganistan draselný

NH_3-N-amoniakový dusík

TOC-celkový organický uhlík

AC-aktivní uhlí

EC-elektrická vodivost

TN-celkový dusík

TP-celkový fosofor

TSS-celkové nerozpuštěné látky

TC-celkový uhlík

IC-anorganický uhlík

Fe-železo

% - procento

mm-milimetr

m^2-metr čtvereční

cm-centimetr

l/s-litr za sekundu

ha-hektar

°C-stupeň Celsia

mg/l-miligram za litr

$\mu S \cdot cm^{-1}$ - mikrosekunda za centimetr

m^3-metr krychlový

h-hodina

l/min-litr za minutu

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Orientační klasifikace znečištění srážkových vod [16] 24
Tabulka 2 Typické znečišťující látky [16] 25
Tabulka 3 Analýza vzorků [32] 44
Tabulka 4 Výsledky chemického rozboru 54
Tabulka 5 Účinnost v procentech 54

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Extenzivní vegetační zelená střecha ve Střílkách [9] 13
Obrázek 2 Ukázka realizace intenzivní zelené střechy [9] 14
Obrázek 3 Ukázka realizace polointenzivní zelené střechy [9] 14
Obrázek 4 Ukázka realizace biosolární zelené střechy [9] 16
Obrázek 5 Střešní vtok s revizní šachtou [9] 18
Obrázek 6 Zelená fasáda a obytná stěna [14] 21
Obrázek 7 Ukázka realizace živé stěny [13] 22
Obrázek 8 Ukázka modulární živé stěny s jedlými rostlinami [13] 23
Obrázek 9 Účinnost odstranění E.coli [15] 28
Obrázek 10 Množství $KMnO_4$ ve variantách substrátu [23] 31
Obrázek 11 Náčrt modulární zelené střechy [32] 42
Obrázek 12 Množství železa v závislosti na době produkce odtoku [32] 45
Obrázek 13 Situace výzkumného centra AdMaS 46
Obrázek 14 Zelená střecha na terase budovy P4 47
Obrázek 15 Rozdělení ploch areálu v procentech 47
Obrázek 16 Akumulační nádrž 48
Obrázek 17 Půdorys retenční nádrže 49
Obrázek 18 Peletizované surové otruby 50
Obrázek 19 Pyrolýzní jednotka 50
Obrázek 20 Peletizované pyrolyzované otruby, biochar 51
Obrázek 21 Filtrační zařízení 52
Obrázek 22 Zátka vyrobená 3D tiskárnou 53
Obrázek 23 Graf účinnosti TN 55
Obrázek 24 Graf účinnosti IC 55
Obrázek 25 Graf účinnosti TP 56