

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**



**Posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z  
odpadních vod zpracovaných metodou založenou na  
filtraci přes vrstvu vermikompostu**

Certifikovaná metodika

**Pavel Švehla a kolektiv**



**Praha 2023**



**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**



**Posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z  
odpadních vod zpracovaných metodou založenou na  
filtraci přes vrstvu vermikompostu**

Certifikovaná metodika byla schválena Ministerstvem zemědělství ČR,  
Odborem rostlinných komodit pod č. j. MZE 63967/2023-13123

**Pavel Švehla a kolektiv**

**Praha 2023**

---

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného  
projektu NAZV č. QK1910095

**Posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod  
zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu**  
CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QK1910095 „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“.

*Kolektiv autorů*

**Ing. Pavel Švehla, Ph.D. – ČZU v Praze, KAVR**

**Ing. Pavel Michal, Ph.D. – ČZU v Praze, KAVR**

**Ing. Kateřina Grambličková – ČZU v Praze, KAVR**

**doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D. – ČZU v Praze, KAVR**

**Mgr. Alena Grasserová – Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i.**

**prof. RNDr. Tomáš Cajthaml, Ph.D. – Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i.**

---

Posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu

Pavel Švehla a kol.

Vydání první, 2023

Vydavatelství: Česká zemědělská univerzita v Praze

Tisk: Česká zemědělská univerzita v Praze, Provozně ekonomická fakulta - Reprografické studio, Kamýcká 129, 165 00 Praha – Suchdol, [www.reprografickestudio.cz](http://www.reprografickestudio.cz)

© Česká zemědělská univerzita v Praze

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ ČZU v Praze**

Kamýcká 129, 165 00 Praha – Suchdol

tel: +420 224 382 736

<http://www.af.czu.cz/>

ISBN 978-80-213-3341-3

## Abstrakt

Certifikovaná metodika je zaměřena na shrnutí optimálních přístupů k posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu vyprodukovaného při vermikompostování substrátu obsahujícího čistírenský kal. Metody a postupy presentované v rámci této certifikované metodiky mohou být uplatněny za účelem identifikace optimálního postupu čištění odpadní vody daného chemického složení. Důraz je kladen na získání nástroje využitelného k maximalizaci efektivity odstranění jednotlivých mikropolutantů, tedy látek, které i při velice nízké koncentraci představují významné riziko pro životní prostředí. Předmětem zájmu jsou z tohoto pohledu především residua léčiv, nicméně navržené postupy mohou být plnohodnotně aplikovány i při posuzování míry odstranění jakýchkoliv jiných látek. S využitím postupů presentovaných v rámci této certifikované metodiky je možno kvantifikovat míru vlivu mikrobiálního rozkladu, fyzikálně-chemických procesů i vlastní aktivity žížal na odstranění konkrétních sledovaných látek.

Klíčová slova: mikropolutanty, odpadní vody, filtrace, vermikompost, čistírenský kal

## Abstract

The certified methodology summarizes optimal approaches serving for the evaluation of the efficiency of micropollutants removal from wastewater treated using the method based on the filtration through the layer of vermicompost produced within the vermicomposting of the substrate containing sewage sludge. Methods presented in this certified methodology may be used with the aim to identify optimal treatment of wastewater characterised by specific chemical composition. Gaining of the instrument useful for maximizing micropollutants representing high environmental risk even at extremely low concentration removal efficiency is emphasised. From this point of view, mainly drug's residues could be monitored. However, suggested methods could be well used also for the evaluation of the effectivity of other micropollutants removal. Using the methods suggested within this methodology, the influence of microbial degradation, physical-chemical processes as well as the earthworm's activity on the monitored micropollutants removal efficiency could be quantified.

Keywords: micropollutants, wastewaters, filtration, vermicompost, sewage sludge

# Obsah

1. Cíl metodiky.....	1
2. Vlastní popis metodiky .....	1
2.1. Úvod.....	1
2.2. Účel aplikace postupů navržených v rámci této metodiky.....	3
2.3. Aparatura potřebná k realizaci experimentů .....	4
2.4. Postup hodnocení získaných výsledků.....	7
2.4.1. Určení podílu dílčích procesů na odstranění daného mikropolutantu.....	8
2.4.2. Další parametry sloužící k popisu průběhu experimentu .....	9
2.5. Příklad použití postupů navržených v rámci této metodiky .....	10
2.5.1. Vyhodnocení výsledků dlouhodobého experimentu .....	15
2.5.2. Faktory ovlivňující získané výsledky .....	18
2.5.2.1. Postupné změny v osídlení kolon mikroorganismy a žížalami .....	20
2.5.2.2. Potenciální vliv sterilizace na intenzitu fyzikálně-chemických procesů .....	20
2.5.2.3. Vliv způsobu a intenzity dávkování zpracovávané vody.....	21
2.5.2.4. Variabilita vlastností použitého vermikompostu.....	21
2.5.2.5. Rizika spojená s realizací testů s reálnou odpadní vodou .....	22
2.5.2.6. Riziko vyčerpání kapacity systému z pohledu odstranění mikropolutantů.....	22
2.5.2.7. Riziko sorpce sledovaných látek na použité aparatuře .....	22
2.5.2.8. Možnost souběhu různých dílčích procesů .....	22
2.5.2.9. Faktory ovlivňující získané výsledky - souhrn .....	23
2.5.3. Závěry plynoucí z provedených experimentů.....	22
3. Srovnání novosti postupů.....	23
4. Popis uplatnění metodiky.....	23
5. Ekonomické aspekty.....	24
6. Seznam použité literatury .....	26
7. Seznam publikací, které předcházely metodice .....	28
8. Jména oponentů a názvy jejich organizací .....	32
9. Dedikace .....	32
10. Ostatní náležitosti certifikované metodiky: .....	32

## 1. Cíl metodiky

Cílem předkládané metodiky je seznámit provozovatele čistíren odpadních vod, pracovníky společností zaměřených na zpracování odpadů, producenty odpadních vod specifického složení, pracovníky laboratoří zaměřených na rozборы vzorků odpadních vod a na simulaci procesů čištění odpadních vod, výzkumné pracovníky a další zájemce s možností aplikace specifických postupů umožňujících posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu vyrobeného při vermikompostování substrátu obsahujícího čistírenský kal. Metody a postupy presentované v rámci této certifikované metodiky mohou být uplatněny za účelem identifikace optimálního postupu čištění odpadní vody daného chemického složení. Důraz bude kladen na identifikaci cest vedoucích k maximalizaci efektivity odstranění jednotlivých mikropolutantů, tedy látek, které i při velice nízké koncentraci představují významné riziko pro životní prostředí. Předmětem zájmu budou z tohoto pohledu především residua léčiv. Předkládaná metodika bude zpracována takovým způsobem, aby s využitím v ní shrnutých postupů bylo možno 1) vyhodnotit efektivitu odstranění jednotlivých konkrétních mikropolutantů obsažených v reálné odpadní vodě či v jejich synteticky připraveném roztoku v případě aplikace vermikompostu získaného zpracováním substrátu obsahujícího čistírenský kal jako filtrační vrstvy 2) identifikovat optimální parametry vermikompostu použitelného jako filtrační vrstva pro čištění odpadní vody konkrétních vlastností za účelem eliminace mikropolutantů 3) kvantifikovat podíl mikrobiálního rozkladu, fyzikálně-chemických procesů a aktivity žížal na odstranění konkrétních mikropolutantů v daných podmínkách.

## 2. Vlastní popis metodiky

### 2.1. Úvod

Městské odpadní vody jsou zpravidla čištěny v tzv. mechanicko-biologických čistírnách odpadních vod (ČOV), tedy v zařízeních, která za účelem odstranění nejrůznějších znečišťujících látek aplikují kombinaci mechanických, biologických a případně také fyzikálně-chemických procesů. Při čištění průmyslových odpadních vod je v závislosti na konkrétních vlastnostech zpracovávané vody, které jsou velice variabilní, zapotřebí aplikovat specifické procesy čištění založené nejčastěji na principu různých fyzikálně-chemických metod (Chudoba et al., 1991).

Významným problémem při čištění městských i průmyslových odpadních vod je skutečnost, že aktuálně dostupné a běžně aplikované procesy čištění zpravidla nejsou schopny zajistit dostatečně efektivní odstranění mikropolutantů typu residuí léčiv a dalších látek vykazujících negativní vliv na životní prostředí i na lidské zdraví již ve velmi nízkých koncentracích (Kotýza et al., 2009). Navíc přítomnost mikropolutantů spadajících mezi antibiotika v životním prostředí podporuje bakteriální rezistenci vůči těmto látkám (Ebele et al., 2017; Kujawska et al., 2022). Řada látek z kategorie mikropolutantů vykazuje také hormonální aktivitu, přičemž je označována za tzv. endokrinní disruptory (Kavlock et al., 1996; Ankley et al., 1997; Mendes, 2002). Odpadní vody jsou přitom nejčastějším primárním zdrojem těchto látek vyskytujících se v přírodě (Daughton et al., 1999; Reis et al., 2019). Intenzita vnosu zmíněných mikropolutantů do životního prostředí přitom neustále roste (Abraham, 2010; Morgan, 2006; Phoon et al., 2020).

Přestože se část těchto látek sorbuje na kal v průběhu primárního (mechanického) i sekundárního (biologického) čištění (Joss et al., 2005; Ternes et al., 2004) a další část podléhá biologickému rozkladu při biologickém čištění (Wang, 2009; Semblante et al., 2015; Zhang, 2019), ve vodě vypouštěné z ČOV do přírodních vod je obsah některých mikropolutantů stále relativně vysoký (Kotyza et al., 2009; Daughton et al., 1999; Reis et al., 2019). Uspokojivá často není ani efektivita procesů aplikovaných cíleně za účelem odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpravidla v rámci jejich dočišťování. Tyto postupy mohou být založeny například na sorpci na aktivní uhlí či na různých membránových procesech (Kotyza et al., 2009; Baker, 2012; Purkait and Singh, 2018).

Z výše nastíněných důvodů se jeví jako nezbytné identifikovat vhodné inovativní postupy zpracování odpadních vod, které zajistí efektivní odstranění všech mikropolutantů vyskytujících se v odpadní vodě daného složení.

Zajímavou možností je filtrace odpadní vody přes vrstvu vhodného organického materiálu. Tento po technické i ekonomické stránce poměrně nenáročný postup může být za určitých okolností schopen eliminovat pestrou škálu mikropolutantů s využitím kombinace různých biologických a fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě řešeného materiálu. Zvláštní pozornost je potřeba věnovat možnosti využití vermikompostu jako filtračního media (Zeb et al., 2020). Za účelem využití metody založené na filtraci odpadních vod přes vrstvu vermikompostu v praxi je možno využít zkušenosti z provozů čištění odpadních vod metodou označovanou jako vermifiltrace (Domínguez, 2004; Sinha et al., 2008; Krishnasamy et al., 2013; Singh et al., 2017). Filtraci odpadní vody přes vrstvu vermikompostu je pak možno aplikovat jako specifickou variantu předčištění odpadní vody s cílem co nejvíce snížit koncentraci mikropolutantů v dané odpadní vodě a následně předčištěnou vodu zpracovat ve standardním systému čištění odpadních vod. V případě vhodných podmínek je možno uvažovat i o aplikaci procesu jako komplexního systému čištění odpadních vod ve shodě s principy výše zmíněné vermifiltrace.

Při vermikompostování dochází k degradaci vhodné organické hmoty v rámci součinnosti aktivity žížal a různých skupin mikroorganismů. Jednou ze surovin využitelných pro proces vermikompostování je kal vznikající při čištění odpadních vod (Dume et al., 2022). Tento materiál obsahuje pochopitelně řadu mikropolutantů vyskytujících se v odpadní vodě, při jejímž čištění byl kal vyprodukovan. Při vermikompostování tohoto materiálu, které je poměrně dlouhodobým procesem, vzniká směsná kultura mikroorganismů, která se postupně adaptuje na podmínky prostředí a díky tomu je schopná biologické degradace řady mikropolutantů. K eliminaci mikropolutantů může přispět i vlastní aktivita žížal, resp. enzymů, které žížaly produkují (Zeb et al., 2020). V produktu vermikompostovacího procesu (tedy ve vzniklém vermikompostu) pak pochopitelně zůstává zmíněná mikrobiální kultura i enzymy produkované žížalami a v řadě případů také vlastní živé žížaly.

Za předpokladu aplikace vermikompostu jako filtrační vrstvy pro čištění odpadních vod je pak možno využít specifickou směsnou mikrobiální kulturu schopnou degradovat mikropolutanty, která byla vykultivována při vermikompostování substrátu obsahujícího čistírenský kal, a enzymy produkované žížalami, které také mohou přispívat k biochemickému rozkladu řešených mikropolutantů. V případě, že vermikompost použitý jako filtrační materiál bude obsahovat také živé žížaly, bude možno využít i jejich vlastní aktivitu za účelem odstranění řešených mikropolutantů.



Schopnost vermikompostu zachytit různé mikropolutanty je však velice selektivní. Různé mikropolutanty vykazují velice různorodou biologickou rozložitelnost a silně se liší také možnost zachycení různých mikropolutantů fyzikálně-chemickými procesy, ze kterých je nejvýznamnější sorpce na použitý filtrační materiál. Proto se jeví jako nezbytné vyvinout přesně definovaný postup, s jehož využitím bude možné určovat efektivitu odstranění konkrétních mikropolutantů při zpracování odpadní vody filtrací přes vrstvu vermikompostu. Zároveň je zapotřebí, aby vyvinutý postup umožnil kvantifikovat podíl biochemických rozkladných procesů, fyzikálně-chemických dějů i samotné aktivity žížal na odstranění konkrétních mikropolutantů v konkrétních podmínkách tak, aby bylo možno navrhnout optimální variantu uspořádání systému filtrace pro zpracování odpadní vody daných vlastností.

## **2.2. Účel aplikace postupů navržených v rámci této metodiky**

Postupy navržené v této metodice jsou koncipovány takovým způsobem, aby umožňovaly vyhodnotit efektivitu filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu z pohledu odstranění jednotlivých konkrétních mikropolutantů. Mohou být aplikovány za účelem posouzení možnosti zpracování odpadní vody konkrétních vlastností, resp. odpadní vody vznikající v rámci určitého konkrétního zdroje (obce, průmyslového závodu, zdravotnického zařízení atd.). V takovém případě se předpokládá zpracování reálného vzorku dané odpadní vody v aparatuře popsané v kapitole 2.3. s tím, že hodnocen bude vliv zpracování vody ve vrstvě vermikompostu na určitý okruh mikropolutantů, který bude identifikován iniciátorem studie, například provozovatelem ČOV či producentem dané odpadní vody. Na základě výsledků provedených experimentů bude možno rozhodnout, zda pro daný typ odpadní vody bude z hlediska odstranění určitého okruhu mikropolutantů smysluplné její zpracování filtrací přes vrstvu vermikompostu. V případě, že bude možno konstatovat vhodnost postupu pro čištění řešené odpadní vody, bude možno závěry plynoucí z provedených experimentů využít k identifikaci optimálních technologických parametrů pro plně provozní aplikaci systému.

Velký potenciál mají testy zmiňované v rámci této metodiky také pro čistě výzkumné účely. Z tohoto pohledu se jeví jako velice zajímavé sledovat osud jednotlivých látek ve filtračním systému bez ambice přímého návrhu postupu čištění odpadní vody určitých konkrétních vlastností. Pro tyto účely se jeví jako optimální připravit syntetický roztok řešeného mikropolutantu, resp. několik jeho různě koncentrovaných syntetických roztoků, a tento roztok, resp. tyto roztoky, podrobit zpracování filtrací přes vrstvu vermikompostu postupy doporučenými v rámci této metodiky. Za těchto podmínek je možno pracovat s materiálem o přesně definované koncentraci sledované látky a bez případných rušivých vlivů dalších látek vyskytujících se v reálných vzorcích odpadních vod. Jako velice účelné se pak jeví pracovat také se syntetickými roztoky obsahujícími v požadované koncentraci několik různých mikropolutantů.

Smysl mají postupy navržené v rámci této metodiky také pro optimalizaci procesu vermikompostování čistírenského kalu z pohledu využitelnosti vyprodukovaného vermikompostu jako materiálu aplikovatelného jako filtrační materiál pro zpracování odpadních vod za účelem eliminace různých mikropolutantů. V této souvislosti je možno navržené postupy realizovat s vermikompostem vzniklým vermikompostováním za různých podmínek (různé zastoupení čistírenského kalu v substrátu podrobeném vermikompostování, různé způsoby stabilizace či jiných úprav kalu před zahájením vermikompostovacího procesu, různé materiály použité při vermikompostování jako substrát ve směsi s čistírenským kalem, technologické podmínky vermikompostovacího procesu atd.). Na základě výsledků

experimentů je pak možno definovat optimální varianty pro praktickou aplikaci procesu filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu.

### **2.3. Aparatura potřebná k realizaci experimentů**

Za účelem posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu je potřeba sestavit vhodnou laboratorní aparaturu.

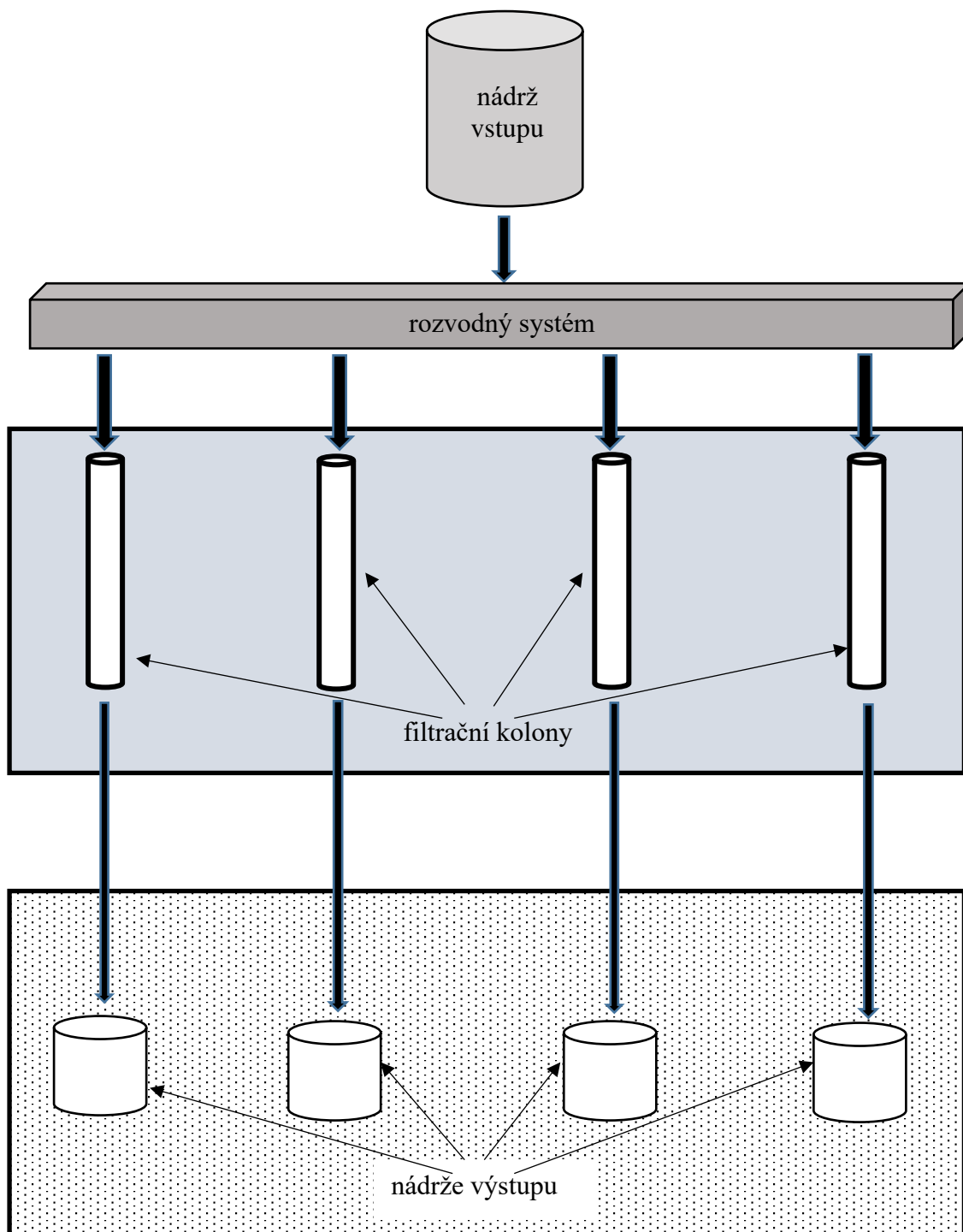
Tato aparatura obsahuje nádrž sloužící jako zásobník zpracovávané odpadní vody, resp. zásobník syntetického roztoku řešeného mikropolutantu, resp. směsi několika řešených mikropolutantů. Dalším nezbytným komponentem řešené aparatury je rozvodný systém sloužící k transportu zpracovávané odpadní vody, resp. zpracovávaného syntetického roztoku řešených mikropolutantů, z nádrže použité jako zásobník zpracovávané odpadní vody, resp. zásobník syntetického roztoku řešených mikropolutantů do filtračních kolon. Rozvodný systém je tvořen soustavou hadiček z vhodného materiálu. V tomto směru se osvědčily silikonové hadičky. Nezbytnou součástí popisovaného rozvodného systému jsou čerpadla vhodných parametrů. Doporučuje se využít peristaltická čerpadla, viz například typy zmiňované v kapitole 2.5. této certifikované metodiky.

Hlavní část popisované aparatury představuje soustavu čtyř či více identických filtračních kolon o celkovém objemu každé použité filtrační kolony 2 – 10 l. Každá kolona je tvořena minimálně dvěma odnímatelnými moduly tvořícími od sebe navzájem oddělitelné vrstvy, přičemž mezi jednotlivé vrstvy je možno vložit izolační mezivrstvu na bázi tkané nebo netkané vodopropustné textilie. Spodní vrstva (uložená ve spodním modulu) slouží k mechanické filtraci zpracovávané odpadní vody a je vyplněna anorganickým materiálem, typicky šterkem či pískem vhodné zrnitosti. Doporučuje se použít alespoň dvě různé zrnitosti, přičemž jemnější vrstva je situována nad hrubší vrstvu. Šterk, resp. písek sloužící v rámci aparatury jako anorganická filtrační vrstva je možno pořídit v provozovnách zaměřených na prodej pomůcek pro akvaristy. Horní vrstva (uložená v horním modulu) každé filtrační kolony slouží k samotné filtraci přes vrstvu vermikompostu.

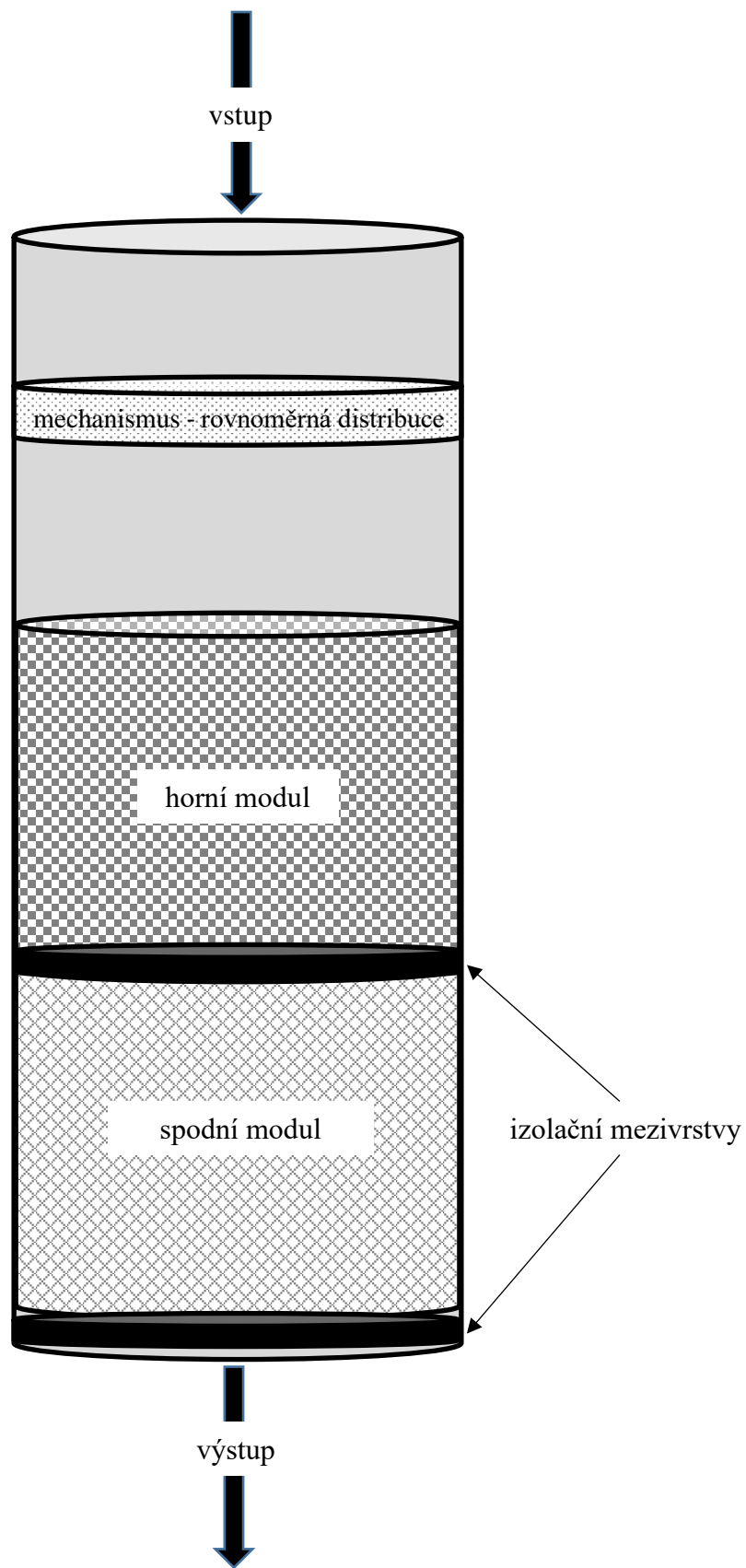
Filtrační kolony jsou zhotoveny z vhodného průhledného materiálu, například z plexiskla. Průtok zpracovávané odpadní vody, resp. roztoku sledovaných mikropolutantů filtrační kolonou je gravitační. V horní části každé z filtračních kolon je umístěn mechanismus pro zajištění rovnoměrné distribuce zpracovávané odpadní vody, resp. syntetického roztoku sledovaných mikropolutantů, po celém průřezu filtrační kolony tvořený například kovovou mřížkou z tahokovu o velikosti otvorů 0,2 x 0,2 cm – 1,0 x 1,0 cm, na kterou odkapává z rozvodného systému zpracovávaná odpadní voda, resp. zpracovávaný syntetický roztok řešených mikropolutantů.

Nedílnou součástí popisované aparatury jsou také nádrže sloužící jako zásobníky odpadní vody zpracované ve filtračních kolonách, resp. zásobníky syntetického roztoku řešených mikropolutantů zpracovaného ve filtračních kolonách.

Aparatura potřebná k realizaci experimentů zaměřených na posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu je zobrazena na obrázku 1. Schéma filtrační kolony použitelné k těmto experimentům je zachyceno na obrázku 2.



Obrázek 1: Laboratorní aparatura pro hodnocení efektivity odstranění mikropolutantů z odpadních vod filtrace přes vrstvu vhodného organického materiálu



Obrázek 2: Základní schéma filtrační kolony

V rámci výše popsané aparatury je ze zásobníku rozvodným systémem dodávána hodnocená odpadní voda, resp. je dodáván syntetický roztok sledovaných mikropolutantů, do

filtračních kolon. Na základě stanovení koncentrace sledovaných mikropolutantů v roztoku vstupujícím do filtračních kolon (v řešené odpadní vodě, resp. v řešeném syntetickém roztoku sledovaných mikropolutantů) a koncentrace sledovaných látek ve výstupu z filtračních kolon je možno určit účinnost odstranění dané sledované látky v jednotlivých filtračních kolonách.

## **2.4. Postup hodnocení získaných výsledků**

Laboratorní aparatura popsaná v předešlé kapitole je koncipována jako soustava filtračních kolon provozovaných paralelně. V tomto uspořádání je ji možno využít ke kvantifikaci podílu jednotlivých dílčích procesů na odstranění konkrétních sledovaných látek. Případné odstranění sledovaných mikropolutantů v anorganické vrstvě je možno kvantifikovat s využitím filtrační kolony, do které není umístěna vrstva vermikompostu. Podíl fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě vermikompostu na eliminaci sledovaných mikropolutantů je možno vyhodnocovat s využitím filtrační kolony, ve které je jako filtrační materiál použit vermikompost, který byl před zahájením provozu laboratorní aparatury sterilizován. Sterilizace může být provedena například s využitím autoklávu, UV záření, ozonizace, chlorace či zahřívání ve vodní lázni. V řadě případů je vhodné vliv fyzikálně-chemických procesů na odstranění sledovaných mikropolutantů paralelně vyhodnocovat ve dvou či více na sobě nezávislých filtračních kolonách, přičemž v každé z použitých kolon je sterilizace provedena jiným procesem. Proces sterilizace realizovaný jakýmkoliv z výše uvedených procesů vyloučí průběh veškerých biochemických procesů a eliminaci sledovaného mikropolutantu v této filtrační koloně je možno připsat výhradně fyzikálně-chemickým procesům. V případě využití dvou či více filtračních kolon, ve kterých je sterilizace provedena různými postupy, je možno posoudit případný vliv vlastního procesu vedoucího ke sterilizaci na eventuální zvýšení efektu fyzikálně-chemických procesů na odstranění sledovaných mikropolutantů (například zvýšení intenzity sorpce v důsledku zvýšení specifického povrchu filtračního materiálu či zvýšení množství aktivních skupin pro chemisorpci vyvolané termickou či chemickou úpravou použitého vermikompostu postupy zmíněnými výše). V případě použití dvou či více nezávislých filtračních kolon sloužících ke kvantifikaci vlivu fyzikálně-chemických procesů je pak reálný příspěvek fyzikálně-chemických procesů k odstranění sledovaných mikropolutantů možno určit jako množství látky eliminované v koloně, ve které je pokles koncentrace látky nejmenší. Tento postup zabezpečí eliminaci, popřípadě alespoň minimalizaci potenciálního nadhodnocení vlivu fyzikálně-chemických procesů způsobeného výše diskutovanými změnami struktury vermikompostu.

Míru zvýšení efektivity odstranění sledovaných mikropolutantů v důsledku mikrobiálního rozkladu je možno posuzovat s využitím filtrační kolony, ve které je jako vrstva filtračního materiálu použit vermikompost, který nebyl podroben sterilizaci zmíněné výše. Tento vermikompost je však zbaven veškerých žízálních včetně jejich vývojových stadií (tzv. kokonů). Příspěvek mikrobiálního rozkladu k odstranění sledovaných mikropolutantů je pak možno odhadnout jako účinnost odstranění sledovaného mikropolutantu v této koloně sníženou o účinnost připadající na fyzikálně-chemické procesy, tedy o účinnost zaznamenanou ve filtrační koloně provozované bez vrstvy vermikompostu a ve filtrační koloně pracující s vermikompostem podrobeným sterilizaci.

Vliv vlastní aktivity žízálních na eliminaci sledované látky je možno určit s využitím filtrační kolony, ve které je jako organická filtrační vrstva použit testovaný vermikompost včetně žízálních v jejich počtu odpovídajícím průměrnému počtu v původním vzorku vermikompostu. Podíl

aktivity žížal na odstranění hodnoceného mikropolutantu je pak možno určit jako rozdíl podílu jeho odstranění v koloně pracující s žížalami a v koloně provozované bez žížal.

### 2.4.1. Určení podílu dílčích procesů na odstranění daného mikropolutantu

Případný podíl procesů probíhajících v anorganické vrstvě na eliminaci sledovaných mikropolutantů je vyhodnocen s využitím filtrační kolony, ve které horní modul není zaplněn testovaným organickým materiálem. Účinnost odstranění konkrétního mikropolutantu fyzikálně-chemickými procesy probíhajícími v anorganické vrstvě filtračního materiálu ( $E_{\text{anorg}}$ ) v procentech je určena z koncentrace daného mikropolutantu ve zpracovávané odpadní vodě, resp. z jeho koncentrace ve zpracovávaném syntetickém roztoku řešených mikropolutantů ( $c_0$ ) a z koncentrace daného mikropolutantu v odtoku z filtrační kolony, ve které horní modul není zaplněn testovaným organickým materiálem ( $c_1$ ). Tato účinnost v procentech je vypočtena dle následujícího vztahu 1:

$$E_{\text{anorg}} = (c_0 - c_1)/c_0 \cdot 100 \% \quad (1)$$

Podíl fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě vermikompostu na eliminaci sledovaných mikropolutantů je vyhodnocen s využitím filtrační kolony, ve které je použit vermikompost, který byl před zahájením provozu aparatury sterilizován. Účinnost odstranění konkrétního mikropolutantu fyzikálně-chemickými procesy probíhajícími ve vrstvě vermikompostu ( $E_{\text{F-CH}}$ ) je určena z koncentrace daného mikropolutantu ve zpracovávané odpadní vodě, resp. z jeho koncentrace ve zpracovávaném syntetickém roztoku řešených mikropolutantů ( $c_0$ ), a z koncentrace daného mikropolutantu v odtoku z filtrační kolony, ve které je použit vermikompost, který byl před zahájením provozu zařízení sterilizován ( $c_2$ ). V případě nenulové účinnosti odstranění sledovaného mikropolutantu v důsledku průběhu fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě anorganického materiálu ( $E_{\text{anorg}}$ ) je tato účinnost odečtena. Účinnost odstranění konkrétního mikropolutantu fyzikálně-chemickými procesy probíhajícími ve vrstvě vermikompostu v procentech je pak vypočtena dle následujícího vztahu 2:

$$E_{\text{F-CH}} = (c_0 - c_2)/c_0 \cdot 100\% - E_{\text{anorg}} \quad (2)$$

V případě použití dvou či více nezávislých filtračních kolon sloužících ke kvantifikaci vlivu fyzikálně-chemických procesů je vlastní příspěvek fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vermikompostu k odstranění sledovaných mikropolutantů určen jako účinnost eliminace daného mikropolutantu zaznamenaná v koloně, ve které je pokles koncentrace daného mikropolutantu nejmenší.

Možnost zvýšení efektivity odstranění sledovaných mikropolutantů v důsledku mikrobiálního rozkladu je posuzována s využitím filtrační kolony, ve které je jako vrstva organického materiálu použit vermikompost, který nebyl podroben sterilizaci. Podíl odstranění daného mikropolutantu v důsledku mikrobiální aktivity je určen jako účinnost ( $E_{\text{mikrobiál}}$ ) vypočtená z jeho koncentrace ve zpracovávané odpadní vodě, resp. z jeho koncentrace ve zpracovávaném syntetickém roztoku řešených mikropolutantů ( $c_0$ ), a z koncentrace daného mikropolutantu v odtoku z filtrační kolony, ve které je jako vrstva organického materiálu použit materiál, který nebyl před zahájením provozu zařízení sterilizován a byly z něj odstraněny žížaly ( $c_3$ ), snížená o účinnost odstranění zjištěnou v důsledku průběhu fyzikálně-chemických procesů ve vermikompostu ( $E_{\text{F-CH}}$ ). V případě nenulové účinnosti odstranění sledovaného

mikropolutantu ve vrstvě anorganického materiálu ( $E_{\text{anorg}}$ ) je tato účinnost odečtena také. Účinnost odstranění konkrétního mikropolutantu mikrobiálním rozkladem v procentech je pak vypočtena dle následujícího vztahu 3:

$$E_{\text{mikrobia}} = (c_0 - c_3)/c_0 \cdot 100\% - E_{\text{F-CH}} - E_{\text{anorg}} \quad (3)$$

Účinnost odstranění daného mikropolutantu způsobená vlastní aktivitou žížal ( $E_{\text{žížaly}}$ ) je určena z jeho koncentrace ve zpracovávané odpadní vodě, resp. z jeho koncentrace ve zpracovávaném syntetickém roztoku řešených mikropolutantů ( $c_0$ ), a z koncentrace daného mikropolutantu v odtoku z filtrační kolony, ve které je jako vrstva organického materiálu použit vermikompost, který nebyl sterilizován, obsahující žížaly ( $c_4$ ), přičemž je odečtena účinnost zaznamenaná v koloně, ve které byl použit vermikompost zbavený veškerých žížal ( $E_{\text{mikrobia}}$ ), účinnost odstranění zjištěná v důsledku průběhu fyzikálně-chemických procesů v organické vrstvě ( $E_{\text{F-CH}}$ ) a účinnost odstranění sledovaného mikropolutantu ve vrstvě anorganického materiálu ( $E_{\text{anorg}}$ ). Účinnost odstranění konkrétního mikropolutantu dosažená v přímé souvislosti s aktivitou žížal je pak vypočtena dle následujícího vztahu 4:

$$E_{\text{žížaly}} = (c_0 - c_4)/c_0 \cdot 100\% - E_{\text{mikrobia}} - E_{\text{F-CH}} - E_{\text{anorg}} \quad (4)$$

#### 2.4.2. Další parametry sloužící k popisu průběhu experimentu

V závislosti na konkrétním účelu realizace experimentů zaměřených na posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu je zapotřebí za účelem co nejobjektivnějšího vyhodnocení testů sledovat celou řadu různých parametrů. Přestože je možno v důsledku filtrace přes vhodný vermikompost předpokládat odstranění různých mikropolutantů z testované vody, nelze vyloučit ani sekundární kontaminaci zpracovávané vody, resp. zpracovávaného syntetického roztoku v důsledku uvolňování různých látek z vermikompostu použitého jako organická filtrační vrstva. Za účelem posouzení rizika uvolňování pevných částic z vermikompostu je účelné v průběhu celého experimentu sledovat v odtoku z filtračních kolon koncentraci nerozpuštěných látek (NL). V případě konfrontace koncentrace NL v odtoku z filtrační kolony a v původní zpracovávané odpadní vodě je možno určit, zda došlo v průběhu zpracování vody ve filtrační koloně ke snížení koncentrace v tomto ukazateli či naopak k jejímu zvýšení. V případě zpracování syntetického roztoku sledovaných mikropolutantů ve filtračních kolonách je možno předpokládat koncentraci NL v tomto roztoku před jeho vstupem do kolony za nulovou. S cílem vyhodnotit riziko uvolňování organických látek z vermikompostu do zpracovávané odpadní vody, resp. do zpracovávaného syntetického roztoku, je možno doporučit monitoring hodnoty chemické spotřeby kyslíku (CHSK), popřípadě také hodnoty biochemické spotřeby kyslíku (BSK) ve vstupu a výstupu filtračních kolon.

Za předpokladu použití filtrace odpadní vody přes vrstvu vhodného vermikompostu jako hlavního procesu vedoucího k vyčištění dané odpadní vody by pochopitelně nárůst hodnot ukazatelů znečištění NL, CHSK, resp. BSK, znamenal velký problém, neboť se jedná o hlavní ukazatele znečištění sledované na odtoku z ČOV za účelem splnění legislativních požadavků (Nařízení vlády č. 445/2021 a související předpisy). Na druhou stranu je ale filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu koncipována spíše jako metoda předčištění odpadní vody s tím, že se počítá s jejím následným čištěním v mechanickém a biologickém stupni čištění (Chudoba et al., 1991). Za těchto okolností nemusí určité navýšení hodnoty jmenovaných ukazatelů znečištění znamenat závažnější problém.

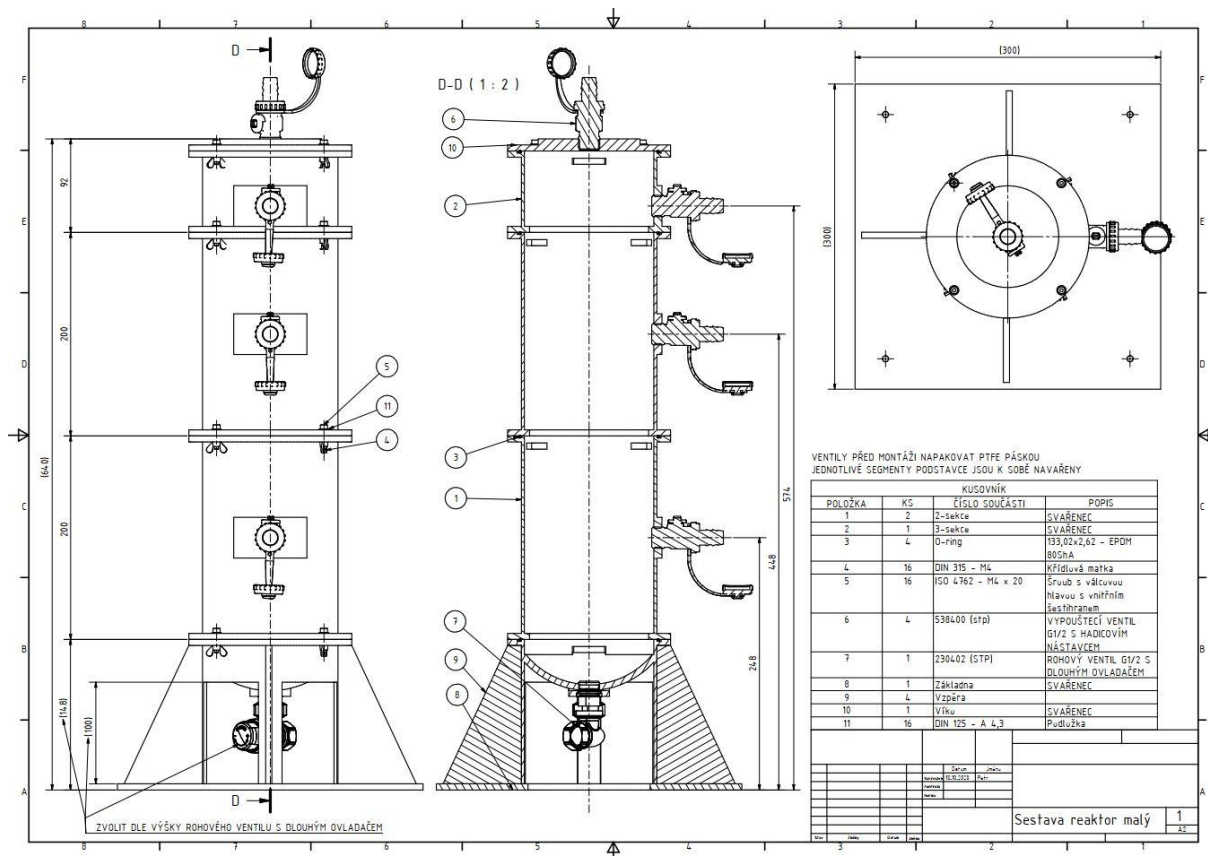
Ze stejných důvodů jako v případě NL, CHSK či BSK je vhodné při experimentech zaměřených na posuzování efektivity eliminace mikropolutantů z odpadních vod sledovat i koncentraci celkového fosforu a různých forem dusíku (celkový, amoniakální, dusičnanový, případně dusitanový). Také tyto polutanty je nutno v závislosti na kapacitě dané ČOV sledovat ve vodě vypouštěné do recipientu (Nařízení vlády č. 445/2021 a související předpisy) a jejich případné uvolňování do čištěné vody při její filtraci přes vermikompost by znamenalo pro provozovatele ČOV významný problém. Nelze vyloučit ani změnu hodnoty pH čištěné vody v důsledku jejího průchodu filtračním systémem. Z těchto důvodů je v odtoku z filtračního systému nezbytné sledovat i tento parametr. Za předpokladu dostupnosti potřebné techniky lze doporučit také monitoring hodnoty pH přímo ve filtrační vrstvě vermikompostu použité ke zpracování čištěné odpadní vody. Důležitým indikátorem průběhu různých biochemických procesů ve filtrační vrstvě vermikompostu je také koncentrace kyslíku v organické vrstvě filtračního materiálu, resp. ve vodě odcházející ze systému. Tento parametr umožňuje určovat, zda procesy ve filtračních kolonách probíhají v aerobních či anoxických, resp. anaerobních, podmínkách. Ze stejného důvodu je možno doporučit monitoring hodnoty redoxního potenciálu v odtoku z filtračních kolon (Pitter, 1999).

Chemické rozborů prováděné za účelem stanovení hodnot všech parametrů zmíněných v této kapitole je možno realizovat dle postupů uvedených v práci Horáková et al. (2003).

## **2.5. Příklad použití postupů navržených v rámci této metodiky**

V rámci výzkumných aktivit spojených s řešením projektu NAZV číslo QK1910095 nazvaného „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“ byla sestrojena aparatura sloužící k hodnocení efektivity odstranění mikropolutantů z odpadních vod filtrací přes vrstvu vermikompostu. Uspořádání této aparatury odpovídalo schématu uvedenému na obrázku 1 v kapitole 2.3., použité filtrační kolony byly konstruovány v souladu s obrázkem 2 uvedeným v téže kapitole. Konkrétní konstrukce filtračních kolon použitých k experimentům je zřejmá z obrázku 3. Sestava všech použitých kolon je zobrazena na obrázku 4.





Obrázek 3: Konstrukce filtračních kolon použitých v rámci experimentů



Obrázek 4: Sestava použitých kolon

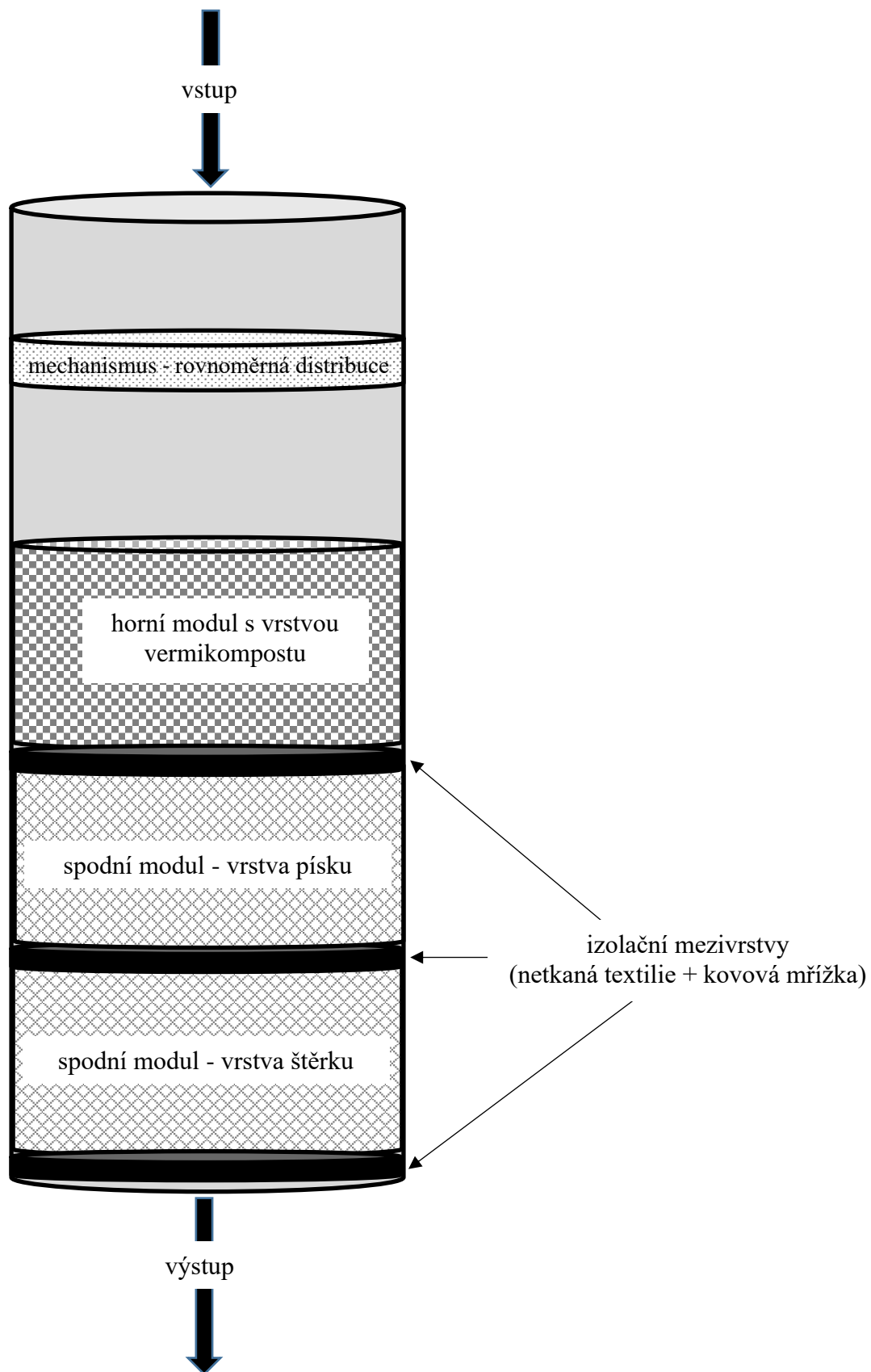
Aparatura obsahovala skleněnou nádrž vstupu o objemu 50 l sloužící jako zásobník syntetického roztoku obsahujícího jako sledované mikropolutanty karbamazepin, diklofenak a hydrochlorothiazid v koncentraci  $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a ibuprofen v koncentraci  $50 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ . Z tohoto zásobníku byl roztok dávkován rozvodným systémem do soustavy čtyř na sobě nezávislých filtračních kolon. Rozvodný systém byl tvořen soustavou silikonových hadiček a čtyřmi peristaltickými čerpadly PCD 21. Celkový objem každé z filtračních kolon činil 6 l. Z filtračních kolon byl zpracováván roztok odváděn do nádrží výstupu, které sloužily jako zásobníky syntetického roztoku řešených mikropolutantů zpracovaného ve filtračních kolonách. Ke každé koloně byla přiřazena samostatná nádrž výstupu.

Každá filtrační kolona byla v souladu s obrázkem 2 uvedeným v kapitole 2.3. tvořena dvěma odnímatelnými moduly tvořícími od sebe navzájem oddělitelné vrstvy, přičemž mezi jednotlivé vrstvy byly vloženy izolační mezivrstvy na bázi netkané textilie v kombinaci s kovovou mřížkou. Spodní modul, který sloužil k mechanické filtraci zpracováváného roztoku řešených mikropolutantů, byl vyplněn anorganickým materiálem. Horní modul sloužil k samotné filtraci přes vrstvu použitého vermikompostu.

Filtrační kolony byly zhotoveny z plexiskla. Zpracováváný roztok sledovaných mikropolutantů přicházel do jednotlivých filtračních kolon vstupem umístěným v horním okraji filtrační kolony. Průtok roztoku sledovaných mikropolutantů filtračními kolonami byl gravitační. Roztok sledovaných mikropolutantů byl z každé z filtračních kolon odváděn výstupem umístěným v dolním okraji filtračních kolon. V každé z filtračních kolon byl umístěn mechanismus sloužící k zajištění rovnoměrné distribuce syntetického roztoku sledovaných mikropolutantů po celém průřezu kolon tvořený kovovou mřížkou s oky o velikosti  $0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ . Tento mechanismus byl kruhového tvaru, který odpovídal vnitřnímu průměru filtračních kolon.

Jednotlivé filtrační kolony byly označeny jako R1, R2, R3 a R4. Zpracováváný roztok mikropolutantů byl do všech filtračních kolon dávkován kontinuálně při průtočné rychlosti

3 120 ml za den. Jako anorganický materiál byl ve všech provozovaných filtračních kolonách použit štěrk a písek, přičemž v níže položené vrstvě spodního modulu byl aplikován štěrk o zrnitosti 4 – 8 mm. Ve výše položené vrstvě pak byl ve spodním modulu použit písek o velikosti částic 0,8 – 1,6 mm. Výška každé z anorganických vrstev činila 5 cm. Jako izolační mezivrstva situovaná nejen mezi horním a spodním modulem, ale také mezi vrstvou štěrku a písku a pod vrstvou písku, tedy na odtoku z filtrační kolony, byla využita netkaná textilie v kombinaci s kovovou mřížkou. Toto řešení bylo zvoleno za účelem minimalizaci přenosu materiálů tvořících jednotlivé filtrační vrstvy do ostatních vrstev a je naznačeno na obrázku 5, který vychází z obecného schématu kolony uvedeného na obrázku 2.



Obrázek 5: Schéma filtračních kolon zohledňující skutečnost, že byly použity dvě samostatné vrstvy anorganického materiálu.

Horní modul byl vermikompostem zaplněn pouze v případě R2, R3 a R4, u R1 nebyl vermikompost použit. K experimentům byl jako organický filtrační materiál použit vermikompost získaný vermikompostováním organického substrátu obsahujícího čistírenský kal z čistírny odpadních vod (ČOV) o kapacitě 33 000 EO (ekvivalentních obyvatel). Kal byl v rámci provozu dané ČOV zpracován anaerobní stabilizací a následně byl odvodněn. Před zahájením vermikompostovacího procesu byl smíchán se slámou v poměru 1 : 4 (sláma : čistírenský kal; jedná se o poměr sušiny obou substrátů).

Do každé z popsaných kolon byl vermikompost přidán v množství 1 kg vlhké hmoty. V R4 byl použit vermikompost aplikován v původní podobě, tedy včetně 184 kusů žížal, resp. včetně 22,62 g jejich biomasy. V R3 byl vermikompost ručně zbaven žížal a jejich kokonů. V R2 byl použit vermikompost, který byl nejprve sterilizován ve vodní páře po dobu tří hodin při teplotě 121 °C v autoklávu SANYO LaboAutoclave MLS-3781L.

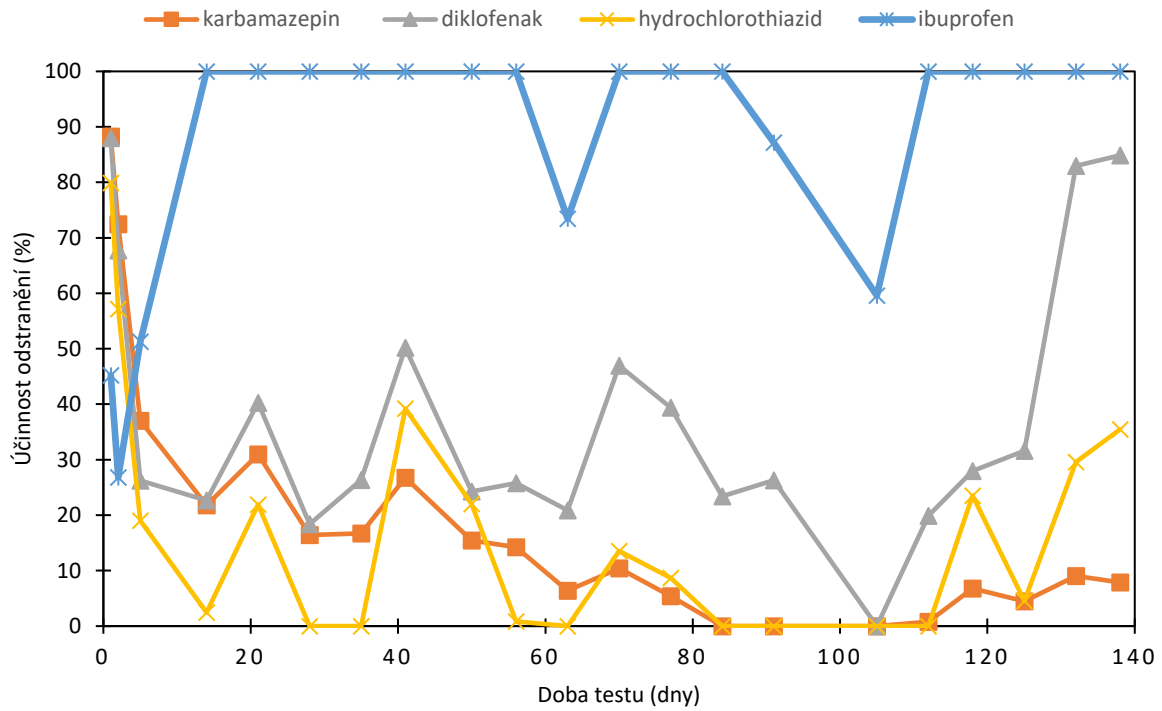
Podíl fyzikálně-chemických procesů probíhajících v anorganické vrstvě, podíl fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě vermikompostu, podíl mikrobiálního rozkladu a podíl vlastní aktivity žížal na celkové účinnosti sledovaných mikropolutantů byl určován postupem naznačeným v kapitole 2.4.1.

Experiment probíhal po dobu 138 dnů, přičemž v pravidelných intervalech byla sledována koncentrace ve výstupu z jednotlivých filtračních kolon. Výjimkou byl provoz kolony R1, tedy kolony, ve které nebyla přítomna vrstva organického filtračního materiálu. Vzhledem k vývoji testu v této koloně (viz následující kapitola) byl její provoz ukončen již po 41 dnech. Z koncentrace řešených látek v původním roztoku a ze zjištěné koncentrace vypočtené dle postupů uvedených v kapitole 2.4.1. byla pro každou kolonu určena účinnost odstranění jednotlivých sledovaných mikropolutantů. Stanovení koncentrace sledovaných mikropolutantů bylo provedeno pomocí kapalinové chromatografie s využitím hmotnostního spektrometru Agilent 6470. Pro chromatografickou separaci analytů byla použita kolona Agilent Poroshell 120 EC-C18.

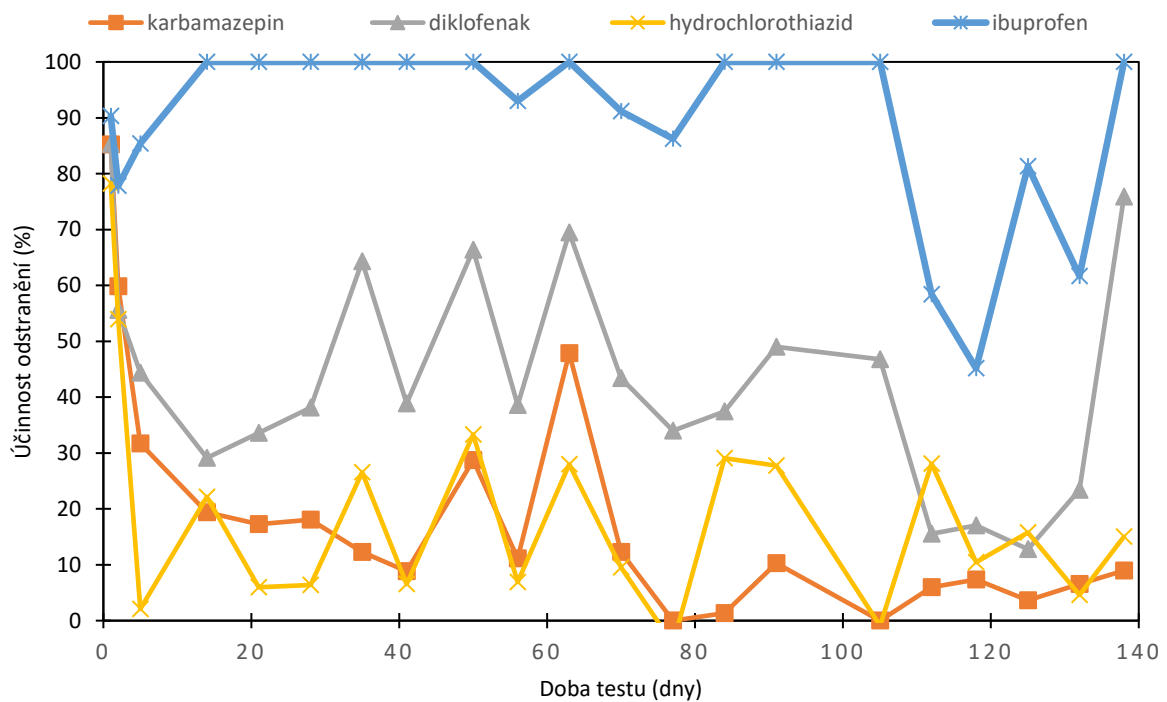
### **2.5.1. Vyhodnocení výsledků dlouhodobého experimentu**

V R1, tedy v koloně provozované bez vrstvy organického filtračního materiálu byla během 41 dnů, tedy v rámci osmi odběrů vzorků roztoku zpracovaného ve filtrační koloně zaznamenána nulová účinnost odstranění všech sledovaných mikropolutantů. Výjimkou byla první tři měření u karbamazepinu, při kterých účinnost jeho odstranění dosáhla 2 – 4 %. V následujících pěti měřeních již ani u této látky nebyl zaznamenán žádný pokles její koncentrace v důsledku průchodu zpracovávaného roztoku kolonou R1. Pokud zohledníme všech osm realizovaných odběrů vzorků odtoku z kolony R1, dojdeme v rámci celého provozu R1 k průměrné účinnosti odstranění karbamazepinu dosahující cca 1 %.

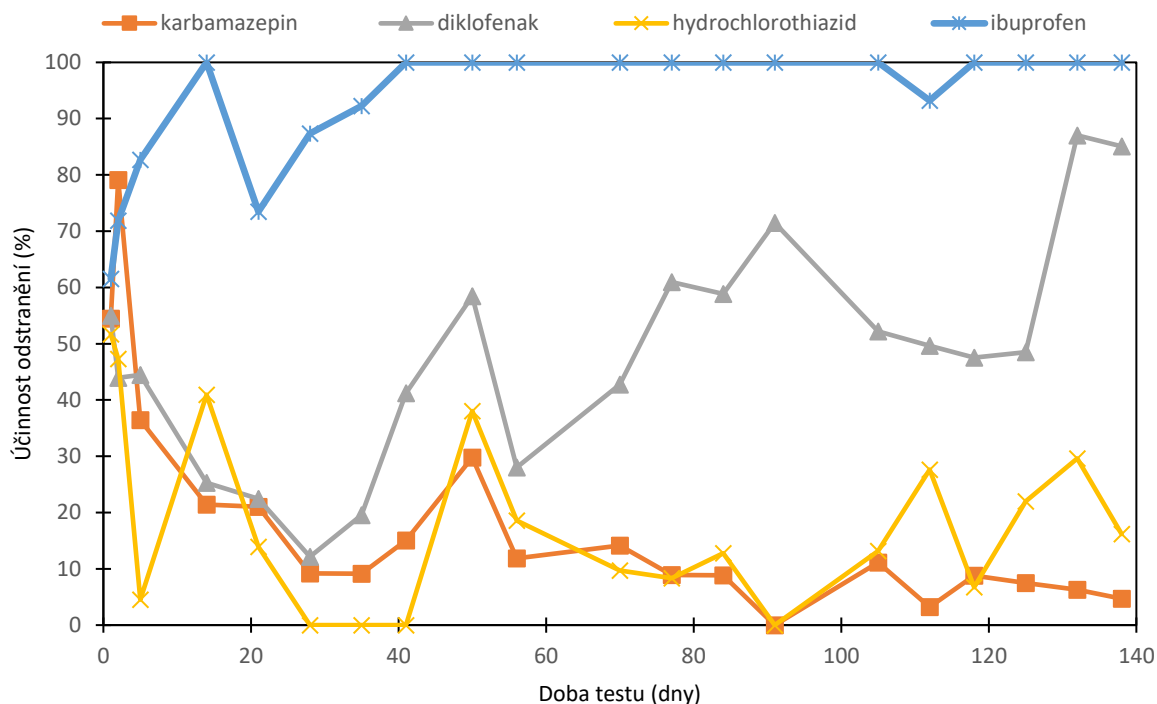
Vývoj účinnosti odstranění všech sledovaných látek v kolonách R2, R3 a R4 je zaznamenán na obrázcích 6 – 8.



Obrázek 6: Účinnost odstranění sledovaných mikropolutantů v R2



Obrázek 7: Účinnost odstranění sledovaných mikropolutantů v R3



Obrázek 8: Účinnost odstranění sledovaných mikropolutantů v R4

Z obrázků 6 – 8 je zřejmé, že účinnost odstranění všech sledovaných látek poměrně významně kolísala, přičemž nebyly zaznamenány žádné dlouhodobější zřetelné trendy naznačující postupný vývoj hodnot k hodnotám vyšším či nižším. Zároveň je z obrázků evidentní, že je účinnost odstranění jednotlivých mikropolutantů velice rozdílná. To je ve shodě se závěry studií posuzující odstranitelnost sledovaných mikropolutantů v klasických systémech čištění odpadních vod (Joss et al., 2006; Li et al., 2013; Urase et al., 2005).

Zatímco u ibuprofenu bylo po významnou dobu provozu všech tří kolon dosaženo 100% eliminace látky, u diklofenaku byly ve všech provozovaných kolonách často zaznamenány účinnosti nižší než 30 %. Ještě méně významný byl efekt filtrace ve všech provozovaných kolonách z pohledu odstranění hydrochlorothiazidu a karbamazepinu. U těchto látek účinnost odstranění ve všech provozovaných kolonách často nedosahovala ani 10 %. Průměrná celková účinnost odstranění všech sledovaných mikropolutantů dosahovala v průběhu celého experimentu hodnot uvedených v tabulce 1.

Tabulka 1: Průměrná celková účinnost odstranění sledovaných látek za celé období experimentu v procentech.

karbamazepin	diklofenak	hydrochlorothiazid	ibuprofen
18,9 ± 23,1	47,7 ± 20,1	19,3 ± 19,5	93,1 ± 11,7

Vyhodnocení vlivu procesů probíhajících v anorganické vrstvě, fyzikálně-chemických procesů probíhajících v organické vrstvě, mikrobiální aktivity a aktivity vlastních žížel na celkovou účinnost odstranění jednotlivých sledovaných látek realizované dle postupu uvedeného v kapitole 2.4. na základě průměrné účinnosti odstranění jednotlivých látek za celou

dobu experimentu v kolonách R1, R2, R3 a R4 vedlo ke zjištění, že tyto procesy se na celkovém odstranění mikropolutantů podílejí způsobem procentuálně vyčísleným v tabulce 2. Například pro karbamazepin bylo zjištěno, že na jeho celkové účinnosti odstranění dosahující průměrně 18,9 % (tabulka 1) se z 93,5 % podílely fyzikálně-chemické procesy probíhající ve vrstvě vermikompostu, z 5 % procesy probíhající v anorganické vrstvě a z 1,4 % mikrobiální aktivita. Příspěvek aktivity žížal byl v tomto případě nulový (tabulka 2).

Tabulka 2: Průměrný podíl dílčích procesů na odstranění sledovaných mikropolutantů vyjádřený v procentech

	karbamazepin	diklofenak	hydrochlorothiazid	ibuprofen
<b>Aktivita žížal</b>	0	8,3	0	4,3
<b>Mikrobiální aktivita</b>	1,4	13,6	11,7	1,4
<b>Fyzikálně-chemické procesy v organické vrstvě</b>	93,3	78,1	88,3	94,2
<b>Procesy v anorganické vrstvě</b>	5,3	0	0	0

Z výsledků shrnutých v tabulce 2 je zřejmé, že v podmínkách experimentu nebyla z pohledu odstranění sledovaných látek příliš významná aktivita žížal. Její příspěvek k celkové účinnosti odstranění sledovaných mikropolutantů byl největší v případě diklofenaku, u kterého představoval 8,3 %. U karbamazepinu a hydrochlorothiazidu byl příspěvek žížal vyhodnocený postupy presentovanými v rámci této metodiky dokonce nulový.

Poměrně překvapivé je zjištění, že ani příspěvek mikrobiálních degradačních procesů probíhajících ve vrstvě vermikompostu nebyl příliš významný. U diklofenaku představoval 13,6 % z celkového množství látky odstraněné v systému, u hydrochlorothiazidu odpovídal příspěvek mikrobiální aktivity 11,7 %. V rámci sledování osudu karbamazepinu a ibuprofenu v jednotlivých filtračních kolonách bylo zjištěno, že mikrobiální aktivita nezpůsobila ani 2 % z celkového množství těchto látek odstraněných ve sledovaném systému.

Z provedených experimentů se jako nejvýznamnější cesta vedoucí k odstranění u všech sledovaných látek jeví fyzikálně-chemické procesy probíhající ve vrstvě vermikompostu s tím, že u karbamazepinu měly patrně určitý vliv i fyzikálně-chemické procesy probíhající v anorganické vrstvě filtračního systému (viz též první odstavec této kapitoly). Podíl fyzikálně-chemických procesů probíhajících ve vrstvě vermikompostu na celkové účinnosti odstranění sledovaných látek dosahoval 78,1 – 94,2 % s tím, že nejvyšší byl v případě ibuprofenu.

### 2.5.2. Faktory ovlivňující získané výsledky

V předchozí kapitole byly vyhodnoceny výsledky experimentů z pohledu dlouhodobého průběhu pokusů. Z obrázků 6 – 8 je však zřejmé, že koncentrace sledovaných látek na výstupu z jednotlivých filtračních kolon, resp. účinnost odstranění sledovaných látek v jednotlivých kolonách, silně kolísala. To je zřejmé i z velmi vysokých hodnot směrodatné odchylky zjištěné u celkové účinnosti odstranění jednotlivých látek, které jsou uvedeny v tabulce 1. V tabulce 3 je k dispozici porovnání účinnosti odstranění sledovaných látek 28. a 50. den experimentu. Z tohoto porovnání je fluktuace výsledků zvláště dobře zřejmá.



Tabulka 3: Celková účinnost odstranění sledovaných látek 28. a 50. den experimentu vyjádřená v procentech

den měření	diklofenak	hydrochlorothiazid	ibuprofen	karbamazepin
28.	12,2	0,0	87,4	9,2
50.	58,4	38,0	100	29,8

Aktuální hodnota účinnosti odstranění konkrétního mikropolutantu v jednotlivých filtračních kolonách může být pochopitelně v rámci dlouhodobého experimentu popsaného výše ovlivněna celou řadou různých faktorů.

#### 2.5.2.1. Postupné změny v osídlení kolon mikroorganismy a žížalami

Doba experimentu (138 dnů) je natolik dlouhá, že je potřeba počítat s rizikem „kontaminace“ kolony R2 provozované se sterilizovaným vermikompostem různými mikroorganismy, které se do prostředí kolony mohou zvenčí dostat. Zároveň nelze vyloučit postupnou adaptaci mikroorganismů (a žížal) na podmínky panující v jednotlivých kolonách včetně možnosti postupného nárůstu účinnosti odstranění sledovaných látek v důsledku této adaptace. Pochopitelně může postupně docházet také ke změnám v množství mikroorganismů i žížal. V průběhu experimentu může také v důsledku mikrobiální aktivity, resp. v důsledku aktivity žížal, docházet k postupnému vyčerpání organického substrátu přítomného v použitém vermikompostu s rizikem následného snížení efektivity odstranění sledovaných látek. Podobná může být situace i v souvislosti s obsahem nejrůznějších živin anorganické povahy.

#### 2.5.2.2. Potenciální vliv sterilizace na intenzitu fyzikálně-chemických procesů

Je také potřeba počítat s rizikem, že vlastní proces sterilizace může ovlivnit efektivitu odstranění sledovaných látek v koloně provozované s využitím sterilizovaného vermikompostu. Nelze vyloučit, že zpracování vermikompostu v autoklávu aplikované v rámci popisovaného experimentu může vést ke zvýšení sorpční kapacity vermikompostu. Intenzita fyzikálně-chemických procesů ve vrstvě vermikompostu pak může být v koloně R2 vyšší ve srovnání s kolonami R3 a R4. Tento jev může být dokonce příčinnou vyšší celkové účinnosti odstranění jednotlivých sledovaných látek v R2 ve srovnání s R3 a R4 v některých fázích provozu filtračního systému. Pro ilustraci je v tabulce 4 shrnuta situace pozorovaná 41. den experimentu. Kromě ibuprofenu, který byl se 100 % účinností odstraněn ve všech kolonách, byla účinnost v koloně R2 pracující se sterilizovaným vermikompostem výrazně vyšší než v koloně s původním kompostem zbaveným žížal (R3) i v koloně s původním vermikompostem, ve kterém byly přítomny žížaly v původním množství (R4).

Tabulka 4: celková účinnost odstranění sledovaných látek v jednotlivých kolonách vyjádřená v procentech (data ze 41. dne experimentu).

kolona	diklofenak	hydrochlorothiazid	ibuprofen	karbamazepin
R2	50,2	41,4	100,0	26,7
R3	38,9	6,5	100,0	8,8
R4	41,2	0,0	100,0	15,0

Právě z těchto důvodů se jeví jako účelné vliv fyzikálně-chemických procesů na odstranění sledovaných mikropolutantů paralelně vyhodnocovat ve dvou či více na sobě nezávislých filtračních kolonách, přičemž v každé z použitých kolon je sterilizace provedena jiným procesem (viz kapitola 2.4). V těchto podmínkách je pak možno vliv fyzikálně-chemických procesů určit z množství dané látky eliminované v koloně se sterilizovaným vermikompostem, ve které je pokles koncentrace látky nejmenší.

### *2.5.2.3. Vliv způsobu a intenzity dávkování zpracovávané vody*

Zásadní vliv na průběh filtrace v kolonách může mít i způsob a intenzita dávkování zpracovávané odpadní vody, resp. syntetického roztoku řešených mikropolutantů. V rámci popisovaného konkrétního experimentu byl roztok dávkován kontinuálně. Nicméně, v úvahu přichází též semikontinuální průtok kolonami (Chudoba et al., 1991). V podmínkách semikontinuálního průtoku je zpracováván roztok dávkován přerušovaně v určitých intervalech. Přitom výskyt fází, při kterých není do filtrační kolony dávkována zpracovávaná voda, může zlepšit přístupnost kyslíku do filtrační vrstvy, neboť je v těchto fázích pochopitelně možno předpokládat vytvoření většího množství průduchů ve filtrační vrstvě. Tato skutečnost pak může podpořit udržení aerobních zón ve filtrační vrstvě, a tím i zvýšenou aktivitu aerobních mikroorganismů i žížal (Pitter, 1999; Jiang et al., 2016; Taylor et al., 2003). Důležitá je z pohledu provozu filtračních kolon samozřejmě také intenzita průtoku zpracovávaného roztoku. V případě překročení její „kritické“ hodnoty reálně hrozí zaplnění veškerých průduchů vodou a vznik anoxických, či dokonce anaerobních podmínek. „Kritickou“ hodnotu průtoku však pochopitelně není možno definovat universálně, bude determinována aktuálními podmínkami panujícími ve filtrační vrstvě, především konzistencí, pórovitostí a dalšími vlastnostmi vermikompostu použitého v kolonách jako organická filtrační vrstva. Vysoká intenzita dávkování zpracovávané kapaliny může pochopitelně způsobit také přetížení systému daným mikropolutantem a následně snížení efektivity jeho odstranění.

### *2.5.2.4. Variabilita vlastností použitého vermikompostu*

Pokud je vermikompost získaný vermikompostováním substrátu obsahujícího čistírenský kal využit jako materiál pro filtraci odpadní vody (či syntetického roztoku) za účelem posuzování účinnosti eliminace vybraných mikropolutantů, je potřeba respektovat skutečnost, že vlastnosti takového vermikompostu mohou být velmi variabilní v závislosti na vlastnostech substrátu použitého pro vermikompostování a na podmínkách panujících během vermikompostování (Hanc a Vasak, 2015; García-Sánchez et al., 2017; Hanc et al., 2019). Proto je potřeba počítat zejména s proměnlivým obsahem mikroorganismů i žížal ve vermikompostu. Velice různé může být i zastoupení jednotlivých skupin mikroorganismů. Z těchto důvodů je pak pochopitelně nutno předpokládat různou efektivitu odstranění sledovaných látek v důsledku mikrobiální aktivity i aktivity žížal. Z výše presentovaných výsledků naznačujících velice nízký podíl aktivity žížal i mikrobiální činnosti na odstranění sledovaných látek pak proto nelze činit jednoznačné závěry o významu těchto aspektů. Je velice dobře možné, že v případě použití vermikompostu z jiného zdroje by efektivita eliminace řešených mikropolutantů v souvislosti s aktivitou mikroorganismů a/nebo žížal byla podstatně vyšší. Významně se může u vermikompostu z různých zdrojů lišit konzistence, porozita, velikostní frakce částic a další vlastnosti. To je samozřejmě spojeno s variabilitou efektivity fyzikálně-chemických procesů z pohledu odstranění řešených látek.

#### *2.5.2.5. Rizika spojená s realizací testů s reálnou odpadní vodou*

Dalším faktorem, který může významným způsobem ovlivnit průběh filtrace v kolonách je skutečnost, zda experimenty probíhají s reálnou odpadní vodou či se syntetickým roztokem řešených mikropolutantů. V případě testů s reálnou odpadní vodou je v závislosti na konkrétních vlastnostech této vody potřeba počítat s významným obsahem organických látek. Tyto látky pak (za předpokladu jejich biologické rozložitelnosti) budou degradovány ve filtrační vrstvě přítomnými mikroorganismy. To může silně ovlivnit dostupnost kyslíku v koloně (Pitter, 1999), přičemž bude významně zvýšeno riziko vzniku anoxických či dokonce anaerobních prostorů s následnou inhibicí aktivity aerobních mikroorganismů i žížal (Pitter, 1999; Jiang et al., 2016; Taylor et al., 2003). V případě práce s reálnou odpadní vodou je pochopitelně také potřeba počítat s významně rychlejším osídlením filtrační vrstvy mikroorganismy schopnými po určité fázi adaptace degradovat sledované látky. To pak může představovat problém z hlediska posuzování vlivu fyzikálně-chemických procesů v koloně, ve které je jako filtrační materiál použit sterilizovaný vermikompost. Problém vedoucí k rychlejšímu zanášení použitých kolon pochopitelně může představovat zvýšený obsah nerozpuštěných látek ve zpracovávané odpadní vodě.

#### *2.5.2.6. Riziko vyčerpání kapacity systému z pohledu odstranění mikropolutantů*

Na základě výsledků shrnutých v obrázcích 6 – 8 je možno konstatovat, že celková účinnost odstranění sledovaných látek byla u některých látek v prvních dnech pokusu ve srovnání s průměrem za celou dobu 138 dní trvajících experimentu významně vyšší. To se týká zejména karbamazepinu a hydrochlorothiazidu. Je možné, že důvodem této skutečnosti bylo postupné snížení kapacity systému z pohledu schopnosti eliminace sledovaných látek. I s tímto jevem je potřeba minimálně v hypotetické rovině při testech zaměřených na posuzování efektivity odstranění vybraných mikropolutantů z odpadní vody filtrace přes vrstvu vermikompostu počítat.

#### *2.5.2.7. Riziko sorpce sledovaných látek na použité aparatuře*

V případě práce s roztoky obsahujícími různé mikropolutanty je nezbytné soustředit se na výběr materiálu použitého při experimentech. V případě řady látek hrozí velmi reálné nebezpečí, že tyto sloučeniny budou sorbovány na aparaturu použitou v rámci pokusů (nádrž vstupu, rozvodný systém, vlastní filtrační kolony, nádrže výstupu, vzorkovnice pro uchovávání a transport vzorků atd.). Případné zachycení látek na použitou aparaturu může pochopitelně významně ovlivnit získané výsledky a z nich plynoucí závěry. V rámci experimentů dosud provedených na pracovišti KAVR ČZU byl tento problém pozorován zejména při testech zaměřených na potenciální odstranění sulfapyridinu ze syntetického roztoku obsahujícího tuto látku, v určitých etapách výzkumu také u triklosanu. V této souvislosti se jeví jako optimální používat v co největší možné míře aparaturu vyrobenou ze skla na úkor plastových pomůcek. Z hlediska minimalizace chyb ve stanovení koncentrace sledovaných látek je pochopitelně nezbytné věnovat patřičnou pozornost postupům odběru vzorků zpracovávaných odpadních vod, resp. syntetických roztoků sledovaných látek.

#### *2.5.2.8. Možnost souběhu různých dílčích procesů*

Výsledky zaměřené na identifikaci podílu jednotlivých dílčích procesů na odstranění konkrétních sledovaných látek je pochopitelně potřeba považovat za orientační. V řadě případů nelze vyloučit souběh více procesů, který může objektivitu závěrů plynoucích z experimentu významným způsobem ovlivnit. K tomu může dojít zejména u látek, u kterých je zaznamenána

vysoká účinnost odstranění. V rámci výše popsaného konkrétního experimentu je například možné, že ibuprofen byl významně odstraňován i mikrobiální aktivitou, resp. v přímé souvislosti s aktivitou žížal. To, že tato látka byla velice efektivně odstraněna v koloně R2 tedy v systému zaměřeném na kvantifikaci pouze fyzikálně-chemických procesů na odstranění této látky samozřejmě nemůže bezprostředně vyloučit vliv mikrobiální aktivity či aktivity žížal na odstranění látky. Na druhou stranu je však z průběhu testů zřejmé, že látka může být efektivně odstraněna čistě fyzikálně-chemickými procesy bez ohledu na vliv dalších faktorů.

#### *2.5.2.9. Faktory ovlivňující získané výsledky - souhrn*

V každém případě se z výše nastíněných důvodů jeví jako nezbytné věnovat se v rámci navazujícího výzkumu studiu vlivu zmíněných faktorů na průběh procesu filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu s hlavním důrazem na další optimalizaci postupů vedoucích k posuzování efektivity odstranění řešených mikropolutantů, které jsou předmětem této certifikované metodiky. Důležitá je také skutečnost, že jednotlivé faktory mohou svým působením a svou intenzitou silně ovlivňovat dopad ostatních faktorů na fungování systému.

#### **2.5.3. Závěry plynoucí z provedených experimentů**

Provedené experimenty naznačují, že filtrace přes vrstvu vermikompostu v technologických podmínkách aplikovaných v rámci popsaného experimentu nepředstavuje postup využitelný universálně k odstranění široké škály různých mikropolutantů z odpadních vod. Na druhou stranu je zde prostor pro uplatnění procesu za účelem odstranění některých konkrétních látek spadajících do kategorie mikropolutantů. Proto se z dosud provedených experimentů jeví jako reálné aplikovat filtraci přes vrstvu vermikompostu jako proces předčištění určitých specifických odpadních vod, které obsahují neobvykle vysoké koncentrace určitých mikropolutantů a následné další čištění této vody v navazujících stupních čištění. Z tohoto pohledu se nabízí aplikace procesu pro čištění odpadních vod z farmaceutického průmyslu, odpadních vod ze specifických zdravotnických zařízení atd.

Zároveň mohou být výsledky provedených experimentů motivací pro navazující výzkum vedoucí k nalezení vhodnějších technologických podmínek pro filtraci odpadních vod přes vrstvu vermikompostu za účelem efektivního odstranění širšího okruhu mikropolutantů. Velký prostor je jistě v oblasti identifikace optimálních parametrů použitého vermikompostu (typ kalu použitého při vermikompostování, substráty použité ve směsi s kalem při vermikompostování atd.), v optimalizaci způsobu a intenzity průtoku odpadní vody zpracovávané filtrací přes vrstvu vermikompostu atd. Za účelem nastíněného pokračování výzkumu je pak vhodné použít právě postupy simulace filtrace odpadních vod přes vrstvu vermikompostu v laboratorních podmínkách, které jsou hlavním předmětem této certifikované metodiky.

Z výsledků experimentů dále plyne, že vzhledem k omezenému vlivu žížal na odstranění sledovaných látek, není příliš účelné přizpůsobovat podmínky ve filtračním systému životním potřebám žížal (vlhkost ve filtračním systému, zajištění dostatečného množství substrátu pro výživu žížal v průběhu filtračního procesu atd.). Vzhledem ke skutečnosti, že ani mikrobiální aktivita se na základě provedených experimentů nejeví jako zásadní z pohledu odstranění monitorovaných látek, je diskutabilní, zda je nutné provozovat filtrační systém s ambicemi udržet ve filtrační vrstvě aerobní podmínky podporující mikrobiální aktivitu a zároveň nezbytné pro udržení aktivity žížal (Pitter, 1999; Jiang et al., 2016; Taylor et al., 2003). Jako klíčové se zatím na základě provedených experimentů z hlediska odstranění sledovaných látek jeví fyzikálně-chemické procesy probíhající ve vrstvě vermikompostu.

### 3. Srovnání novosti postupů

Problematice odstraňování mikropolutantů z odpadních vod je zvýšená pozornost věnována až v posledních letech, přičemž cílené odstraňování těchto látek není běžně aplikováno. Látky tohoto typu jsou v běžných městských ČOV zpravidla odstraňovány pouze „náhodně“ za předpokladu, že vykazují vlastnosti příhodné k jejich sorpci na kal či k biologické degradaci. Případů praktické aplikace specifických postupů cíleně zaměřených na odstraňování mikropolutantů v rámci terciárního čištění není mnoho. Lepší situace není ani v oblasti čištění průmyslových odpadních vod včetně vod produkovaných ve farmaceutickém průmyslu, ve kterých je možno předpokládat zejména zvýšený výskyt residuí léčiv a látek hormonální povahy. Podrobněji je aktuální stav v oblasti odstraňování mikropolutantů z odpadních vod diskutován v kapitole 2.1.

Myšlenku aplikace filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu za účelem odstranění znečišťujících látek spadajících do kategorie mikropolutantů je možno označit za naprosto unikátní a za zcela novou. Tento přístup byl detailněji rozveden a realizován až v rámci řešení projektu NAZV číslo QK1910095 nazvaného „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“ probíhajícího v letech 2019 – 2023.

V případě záměru využít v praxi filtraci odpadní vody přes vrstvu vermikompostu za účelem odstranění specifických mikropolutantů z odpadních vod je však nezbytné zajistit nástroj sloužící k modelování procesu v laboratorních podmínkách a k posouzení vhodnosti systému založeného na filtraci odpadní vody přes vrstvu vermikompostu pro aplikaci procesu při zpracování odpadní vody daných konkrétních vlastností v daných konkrétních podmínkách z pohledu efektivity odstranění konkrétních mikropolutantů. Právě zmíněný dosud chybějící nástroj je předmětem předkládané certifikované metodiky.

### 4. Popis uplatnění metodiky

Tato certifikovaná metodika shrnuje poznatky získané v rámci výzkumu v oblasti optimalizace postupu posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu. S využitím metodiky je možno posuzovat chování konkrétních mikropolutantů v prostředí filtračního materiálu tvořeného vermikompostem, hodnotit možnost aplikace řešeného postupu při zpracování odpadní vody z konkrétního zdroje a zároveň optimalizovat parametry použitého vermikompostu za účelem maximalizace účinnosti odstranění široké škály různých mikropolutantů.

Primárně je metodika určena provozovatelům městských čistíren odpadních vod a čistíren odpadních vod zaměřených na čištění průmyslových odpadních vod produkovaných ve farmaceutickém průmyslu. Ti ji mohou využít za účelem identifikace optimálního přístupu k odstraňování specifických mikropolutantů z odpadních vod. Podobným způsobem může být metodika využita producenty odpadních vod, zejména vod vznikajících ve farmaceutickém průmyslu.

Předkládanou certifikovanou metodiku mohou využít také společnosti zabývající se nakládáním s odpady, přičemž jim metodika může posloužit jako nástroj k posouzení možnosti využití čistírenského kalu k vermikompostování a k potenciálnímu následnému využití

vyprodukovaného vermikompostu k filtraci odpadní vody za účelem eliminace specifických mikropolutantů.

Metodika může posloužit jako nástroj pro pracovníky laboratoří zaměřených na rozborů vzorků odpadních vod a čistírenského kalu a na simulaci procesů čištění odpadních vod. V rámci těchto laboratoří umožní zavedení komerčně využitelných postupů, které budou nabízeny zákazníkům.

Cenným materiálem může být předkládaná certifikovaná metodika také pro výzkumné organizace a pro jejich pracovníky. Na základní principy presentované v metodice je možno v mnoha různých směrech navazovat v rámci dalšího výzkumu. Metodika může být využita také studenty vysokých škol v rámci přípravy diplomových a bakalářských prací zaměřených na čištění odpadních vod a na využití odpadních materiálů, profitovat z ní mohou i v rámci výuky předmětů zaměřených na čištění odpadních vod a na odpadové hospodářství.

## 5. Ekonomické aspekty

Realizace postupů posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu navržených v rámci této certifikované metodiky je pochopitelně spojena s určitými náklady. Je nezbytné pořídit minimálně čtyři filtrační kolony pro simulaci řešeného procesu. Kolony je možno získat v rámci zakázky od vhodné společnosti zabývající se výrobou různých předmětů z plexiskla. Cena výrobku se pochopitelně může lišit dle konkrétních vlastností použitých materiálů a komponentů, dle konkrétních požadavků týkajících se uspořádání kolon a dle cenové politiky dodavatelů. Část prostředků lze ušetřit snížením počtu odběrných bodů, čímž dojde ke zjednodušení konstrukce a úspoře materiálu. Konkrétní filtrační kolony popsané v kapitole 2.5. byly pořízeny v ceně cca 27 tis. Kč včetně DPH za kus, celkem tedy za čtyři kolony cca 108 tis. Kč u společnosti Plexiplast s.r.o. ([www.plexiplast.cz](http://www.plexiplast.cz)). Další významnou nákladovou položku představují peristaltická čerpadla zajišťující kontinuální přísun zpracovávané odpadní vody, resp. syntetického roztoku sledovaných mikropolutantů, do filtračních kolon. V rámci projektu NAZV číslo QK1910095 nazvaného „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“, z jehož řešení vyplývají mimo jiné výsledky presentované v kapitole 2.5., se osvědčila peristaltická čerpadla PCD 21, jejichž výrobcem byla společnost Kouřil Dávkovací čerpadla ([www.cerpadlakouril.cz](http://www.cerpadlakouril.cz)). Tato čerpadla již nejsou na trhu, nicméně, je velice dobře možné je nahradit peristaltickými čerpadly řady PCD 1000 stejného výrobce. V závislosti na výkonu a dalších parametrech je možno tato čerpadla pořídit od cca 24 tis. Kč včetně DPH. V případě pořízení čtyř samostatných čerpadel bude tedy celková cena dosahovat minimálně 96 tis. Kč. Tyto náklady je však možno významným způsobem redukovat za předpokladu použití jednoho čerpadla PCD 1061.4 stejného výrobce vybaveného specifickou mechanikou pro současné dávkování kapaliny s využitím čtyř samostatných čerpacích segmentů. V takovém případě je jedno čerpadlo schopno obsloužit všechny čtyři použité filtrační kolony, přičemž skutečnost, že průtok v jednotlivých kolonách nelze redukovat samostatně není v podmínkách experimentů popsáných v kapitolách 2.3. a 2.5. na závalu. Čerpadlo PCD 1061.4 je přitom možno v současné době pořídit od cca 35 tis. Kč včetně DPH. S určitými náklady je pochopitelně potřeba počítat také v souvislosti s pořízením nádrže vstupu, tedy zásobníku zpracovávané odpadní vody, resp. syntetického roztoku sledovaných

mikropolutantů, nádrží pro akumulaci odtoku z jednotlivých filtračních kolon, hadiček pro transport zpracovávaného roztoku, drobných komponentů vkládaných do filtračních kolon, anorganickým materiálem pro filtraci (štěrk, písek) atd. Při plánovaném provozu čtyř paralelně provozovaných filtračních kolon (viz kapitola 2.5) lze předpokládat v těchto souvislostech náklady okolo 4 tis. Kč. Celkově lze v souladu s výše presentovanými úvahami celkové náklady na konstrukci a zprovoznění aparatury sloužící k posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu odhadnout na 147 – 208 tis. Kč.

V závislosti na aktuálních podmínkách je nezbytné počítat také s náklady na provedení nezbytných rozborů vzorků zpracovávané odpadní vody, resp. syntetického roztoku řešených konkrétních mikropolutantů. Tyto náklady budou velice variabilní v závislosti na různých faktorech, zejména na rozsahu realizovaných rozborů z pohledu doby trvání experimentu, frekvence vzorkování, množství sledovaných mikropolutantů a dalších parametrů atd. a na dostupnosti analytických metod (zda je možno je realizovat přímo na pracovišti, na kterém experimenty probíhají či nikoliv atd.).

Postupy navrhované v rámci této certifikované metodiky je možno využít v rámci laboratoří zabývajících se rozborů vzorků odpadních vod a simulací procesů čištění odpadních vod či v rámci jiných subjektů ke komerčním aktivitám generujícím zisk. V rámci jednotlivých konkrétních zakázek mohou nabízet svým obchodním partnerům posouzení účinnosti odstranění určitých mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu postupy presentovanými v rámci této metodiky. Hodnota jednotlivých zakázek i zisk plynoucí pro subjekt nabízející tyto postupy pak bude odviset od celkového rozsahu konkrétní zakázky a od cenové politiky subjektu nabízejícího tyto služby.

## 6. Seznam použité literatury

- Abraham, J. 2010. Pharmaceuticalization of society in context: theoretical, empirical and health dimensions. *Sociology*. 44 (4), 603-622.
- Ankley, G.T., Johnson, R.D., Detenbeck, N.E., Bradbury, S.P., Toth, G., Folmar, L.C. 1997. Development of a research strategy for assessing the ecological risk of endocrine disruptors. *Reviews in Toxicology*. 1 (5), 71-106.
- Baker, R.W. 2012. *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons. Newark, California.
- Česko. 2021. Nařízení vlády č. 445/2021 Sb. Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.
- Daughton, C.G., Ternes, T.A. 1999. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change?. In: *Environmental Health Perspectives*. 107 (6), 907-938.
- Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Michal, P., Chane, A.D., Nigussie, A. 2022. Vermicomposting technology as a process able to reduce the content of potentially toxic elements in sewage sludge. *Agronomy* 2022. 12 (9), 2049.
- Ebele, A.J., Abdallah, M.A.E., Harrad, S. 2017. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the fresh water aquatic environment. *Emerging contaminants*. 3 (1), 1-16.
- García-Sánchez, M., Taušnerová, H., Hanč, A., Tlustoš P. 2017. Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuous-feeding system: Changes in chemical and biological parameters. *Waste Management*. 62, 33-42.
- Hanc, A., Hrebeckova, T., Kuzel, S. 2019. Vermicomposting of distillery residues in a vertical-flow windrow system. *Waste and Biomass Valorization*. 10 (12), 3647-3657.
- Hanc, A., Vasak, F. 2015. Processing separated digestate by vermicomposting technology using earthworms of the genus *Eisenia*. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12, 1183-1190.
- Horáková M. a kolektiv. 2000. *Analytika vody*. VŠCHT v Praze.
- Chudoba, J., Dohányos, M., Wanner, J. 1991. *Biologické čištění odpadních vod*, SNTL Praha.
- Jiang, L., Liu, Y., Hu, X., Zeng, G., Wang, H., Zhou, L., Tan, X., Huang, B., Liu, S., Liu, S. 2016. The use of microbial-earthworm ecofilters for wastewater treatment with special attention to influencing factors in performance: a review. *Bioresource Technology*. 200, 999-1007.
- Joss, A., Keller, E., Alder, A.C., Göbel, A., Mc Ardell, C.S., Ternes, T., Siegrist, H. 2005. Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. *Water Research*. 39 (14), 3139-3152.
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., Mc Ardell, C.S., Siegrist, H. 2006. Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: proposing a classification scheme. *Water Research*. 40 (8), 1686-1696.



- Kavlock, R.J., Daston, G.P., DeRosa, C., Fenner-Crisp, P., Gray, L.E., Kaattari, S., Tilson, H. A. 1996. Research needs for the risk assessment of health and environmental effects of endocrine disruptors: a report of the US EPA-sponsored workshop. *Environmental health perspectives*. 104, 715-740.
- Kotyza, J., Soudek, P., Kafka, Z., Vaněk, T. 2009. Léčiva – „nový“ environmentální polutant. *Chemické listy*. 103, 540-547.
- Krishnasamy, K., Robert, J.N., Hughes, J. 2013. Vermifiltration systems for liquid waste management: a Review. *International Journal of Environment and Waste Management*. 12 (4), 382-396.
- Kujawska, A., Kielkowska, U., Atisha, A., Yanful, E., Kujawski, W. 2022. Comparative analysis of separation methods used for the elimination of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from water – a critical review. *Separation and Purification Technology*. 120797.
- Li, X., Xing, M., Yang, J., Zhao, L., Dai, X. 2013. Organic matter humification in vermifiltration process for domestic sewage sludge treatment by excitation emission matrix fluorescence and Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*. 261, 491-499.
- Mendes, J.A. 2002. The endocrine disrupters: a major medical challenge. *Food and Chemical Toxicology*. 40 (6), 781-788.
- Morgan, S.G. 2006. Prescription drug expenditures and population demographics. *Health Services Research*. 41 (2), 411-428.
- Phoon, B.L., Ong, C.C., Mohamed Saheed, M.S., Show, P.L., Chang, J.S., Ling, T.C., Lam, S.S., Juan, J.C. 2020. Conventional and emerging technologies for removal of antibiotics from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 400, 122961.
- Pitter, P. 1999. *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT v Praze.
- Purkait, M.K., Singh, R. 2018. *Membrane technology in separation science*. CRC Press, Boca Raton.
- Reis, E.O., Foureaux, A.F.S., Rodrigues, J.S., Moreira, V.R., Lebron, Y.A.R., Santos, L.V.S., Amaral, M.C.S., Lange, L.C. 2019. Occurrence, removal and seasonal variation of pharmaceuticals in Brazilian drinking water treatment plants. *Environmental Pollution*. 250, 773-781.
- Semblante, G.U., Hai, F.I., Huang, X., Ball, A.S., Price, W.E., Nghiem, L.D. 2015. Trace organic contaminants in biosolids: impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and emerging alternatives. *Journal of Hazardous Materials*. 300, 1-17.
- Singh, S., Angmo, D., Dutta, R. 2020. Vermitechnology: A sustainable approach in the management of solid and liquid waste. In: Bhat, S., Vig, A., Li, F., Ravindran, B. (eds.) *Earthworm assisted remediation of effluents and wastes*. Springer, Singapore.
- Sinha, R.K., Bharambe, G., Chaudhari, U. 2008. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist*. 28, 409-420.

Taylor, M., Clarke, W.P., Greenfield, P.F. 2003. The treatment of domestic wastewater using small-scale vermicompost filter beds. *Ecological Engineering*. 21 (2-3), 197-203.

Ternes, T.A., Herrmann, N., Bonerz, M., Knacker, T., Siegrist, H., Joss, A. 2004. A rapid method to measure the solid – Water distribution coefficient (K<sub>d</sub>) for pharmaceuticals and musk fragrances in sewage sludge. *Water Research*. 38 (19), 4075-4084.

Urase, T., Kikuta, T. 2005. Separate estimation of adsorption and degradation of pharmaceutical substances and estrogens in the activated sludge process. *Water Research*. 39 (7), 1289-1300.

Wang, S.C. 2009. Removal of emerging contaminants in biological treatment. Doctoral dissertation, University of California, Los Angeles.

Zeb, A., Li, S., Wu, J., Lian, J., Liu, W., Sun, Y. 2020. Insights into the mechanisms underlying the remediation potential of earthworms in contaminated soil: A critical review of research progress and prospects. *Science of the Total Environment*. 740, 140145.

Zhang, D. 2019. The role of microorganisms in the removal of pharmaceutical and personal care products. In: *Pharmaceuticals and personal care products: Waste management and treatment technology* (pp. 341-382).

## **7. Seznam publikací, které předcházely metodice**

Dume, B., Hanc, A., Švehla, P., Michal, P., Chane, A.D., Nigussie, A. 2022. Vermicomposting technology as a process able to reduce the content of potentially toxic elements in sewage sludge. *Agronomy*. 12, 2049.

Dume, B. 2022. Vermicomposting of sewage sludge for reasonable nutrient recovery under different C/N ratios. The 6th Sustainable Process Integration Laboratory (SPIL) Scientific Conference (Hybrid). 14. – 15. 11. 2022, Brno, Czech Republic, přednáška.

Gari, B., Hanč, A., Švehla, P., Chane, A.D. 2020. Emissions of methane and carbon dioxide during composting and vermicomposting of sewage sludge. *Sborník konference Racionální použití hnojiv 2020, ČZU v Praze*, 3. 12. 2020, s. 41-48, ISBN: 978-80-213-3054-2.

Gari, B., Hanč, A., Švehla, P. The effect of vermicomposting on the availability of phosphorus in sewage sludge mixed with straw pellets. *Sborník konference Racionální použití hnojiv 2021, ČZU v Praze*, 2. 12. 2021, 129-132, ISBN: 978-80-213-3147-1.

Grambličková, K., Švehla, P., Michal, P., Grasserová, A., Hanč, A., Innemanová, P., Cajthaml, T. 2022. Filtrace odpadní vody přes vrstvu vermikompostu za účelem odstranění vybraných mikropolutantů. In: *Sborník z 3. konference Mladá voda břehy mele 2022. Young Water Professionals Czech Republic, Brno*, 6. – 7. 9. 2022, s. 98-100. ISBN: 978-80-908629-2-0.

Grasserová, A. Vermiremediation of micropollutants from sewage sludge. 18th International symposium on waste management and sustainable landfilling, Sardinia, 11. – 15. 9. 2021, přednáška.

Grasserová, A., Hanč, A., Innemanová, P., Cajthaml, T. 2020. Composting and vermicomposting used to break down and remove pollutants from organic waste: A mini review. *European Journal of Environmental Sciences*. 10, 9-14.

- Hanč, A. 2019. Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu (2019-2023). Konference Biologicky rozložitelné odpady, Náměšť nad Oslavou, 18. – 20. 9. 2019, přednáška.
- Hanč, A., Hřebečková, T. 2019. Vermikomposty – jejich příprava a složení. Konference Racionální použití hnojiv 2019, ČZU v Praze, 15. 11. 2019, s. 41-48, ISBN: 978-80-213-2983-6.
- Hanč, A., Švehla, P., Hnátková, T., Innemanová, P., Cajthaml, T. 2019. Pomohou žížaly odstranit mikropolutanty z čistírenských kalů?. Odpadové forum. 20 (7-8), 24-26.
- Hanč, A., Enev, V., Hřebečková, T., Klučáková, M., Pekař, M. 2019. Characterization of humic acids in a continous-feeding vermicomposting system with horse manure. Waste Management. 99, 1-11.
- Hanč, A., Hřebečková, T., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2021. Conversion of spent coffee grounds into vermicompost. Bioresource Technology. 341, 125925.
- Hanč, A. 2021. Využití vermikompostování ke zpracování bioodpadů. 16. ročník konference Biologicky rozložitelné odpady „Od bioodpadu ke kompostu“, Náměšť nad Oslavou, 15. – 17. 9. 2021, přednáška.
- Hanč, A. 2022. Osud mikropolutantů během kompostování a vermikompostování čistírenských kalů. 17. ročník konference Biologicky rozložitelné odpady, Náměšť nad Oslavou, 21. – 23. 9. 2022, přednáška.
- Hanč, A., Švehla, P., Míchal, P., Innemanová, P., Hřeka, M. 2022. Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu. Praha. Certifikovaná metodika. ČZU v Praze, 39 s. ISBN: 978-80-213-3224-9.
- Hanc, A., Dume, B., Michal, P., Pospisil, V., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2022. Influence of earthworms on the behavior of micropollutants in sewage sludge. The 6th Sustainable Process Integration Laboratory (SPIL) Scientific Conference (Hybrid). 14. – 15. 11. 2022, Brno, Czech Republic, přednáška.
- Hanc, A., Dume, B., Hrebeckova, T. 2022. Differences of enzymatic activity during composting and vermicomposting of sewage sludge mixed with straw pellets. Frontiers in Microbiology. 12, 801107.
- Hřebečková, T., Hanč, A., Roy, A. 2019. Changes of chemical and biological parametes during vermicomposting of kitchen biowaste with an emphasis on pathogens. Waste Forum. 12 (3), s. 187-196.
- Hřebečková, T., Wiesnerová, L., Hanč, A. 2019. Changes of enzymatic activity during a large-scale vermicomposting process with continous feeding. Journal of Cleaner Production. 239, 118127.
- Hřebečková, T., Wiesnerová, L., Hanč, A. 2020. Change in agrochemical and biochemical parametrs during the laboratory vermicomposting of spent mushroom substrate after cultivation of *Pleurotus ostreatus*. Science of the Total Environment. 739, 140085.

Hřebečková, T., Wiesnerová, L., Hanč, A. 2020. Change in layers of laboratory vermicomposting using spent mushroom substrate of *Agaricus subrufescens* P. *Journal of Environmental Management*. 276, 111340.

Hřebečková, T. 2021. Vliv různých druhů bioodpadů na parametry vermikompostování. *Disertační práce*. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Innemanová, P., Esterlová, J., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2020. Vermikompostování jako způsob nakládání se septikovými kaly v rámci provozu kořenových ČOV. 11. konference ODPADOVÉ VODY 2020, Štrbské Pleso, 14. – 16. 10. 2020, s. 285-289.

Innemanová, P., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2021. The pilot-scale vermicomposting of dewatered sewage sludge from a medium-sized WWTP. 18th International symposium on waste management and sustainable landfilling, Sardinia, 11. – 15. 9. 2021, poster.

Innemanová, P., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2022. Pilot-scale vermicomposting of dewatered sewage sludge from medium-sized wastewater treatment plant (WWTP). *Detritus*. 18, 35-41.

Kozlíková, N. 2021. Vermikompostování čistírenského kalu s přidavkem slamněných pelet. *Diplomová práce*. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Matoušková, Z. 2020. Problematika farmak a produktů osobní péče v čistírenských kalech. *Diplomová práce*. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Míchal, P., Hanč, A., Švehla, P. 2019. Inhibiční vliv amoniakálního dusíku při vermikompostování čistírenského kalu a možnosti jeho potlačení. *Waste Forum*. 12 (2), 144-152.

Míchal, P., Hanč, A., Švehla, P. 2019. Vermikompostování čistírenského kalu za účelem eliminace mikropolutantů. 2019. *Sborník konference Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí 2019*, Hustopeče, 19. – 21. 3. 2019, s. 1-5, ISBN: 978-80-85990-34-8.

Míchal, P., Švehla, P., Hanč, A., Innemanová, P., Hnátková, T., Cajthaml, T. 2019. Zpracování čistírenského kalu s využitím žížal. *Sborník konference VODA 2019*, Poděbrady, 18. – 20. 9. 2019, s. 519-522.

Míchal, P., Hanč, A., Tojfllová, B., Frühbauer, P., Švehla, P. 2020. Zhodnocení možnosti aplikace vermikompostování jakožto postupu pro zpracování čistírenského kalu před jeho aplikací na půdu. *Sborník 29. konference KALY A ODPADY 2020*, Senec, 18. – 20. 3. 2020, s. 174-178.

Míchal, P., Grambličková, K., Grasserová, A., Švehla, P., Hanč, A., Innemanová, P., Cajthaml, T. 2022. Aplikace vermikompostu z čistírenského kalu za účelem odstranění vybraných mikropolutantů z odpadních vod. In: *Sborník z 12. konference Odpadové vody 2022*. Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, Štrbské pleso, 19. – 21. 10. 2022, s. 386-389. ISBN: 978-80-973196-3.

Novák, P. 2022. Osud vybraných mikropolutantů během kompostování. *Diplomová práce*. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Picková, B. 2021. Změna fyzikálních a chemických parametrů během kompostování čistírenských kalů. *Diplomová práce*. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Pospíšil, V. 2022. Vliv žížal na chování mikropolutantů v čistírenských kalech. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Říhová, B. 2021. Vermikompostování předkompostovaného čistírenského kalu. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

Semerád, J., Hatasová, N., Grasserová, A., Černá, T., Filipová, A., Hanč, A., Innemanová, P., Pivokonský, M., Cajthaml, T. 2020. Screening for 32 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) including GenX in sludges from 43 WWTPs located in the Czech Republic – Evaluation of potential accumulation in vegetables after application of biosolids. Chemosphere. 261, 128018.

Tojřlová, B. 2020. Faktory inhibující aktivitu žížal v čistírenském kalu. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.

## **8. Jména oponentů a názvy jejich organizací**

Posudek odborníka v daném oboru vypracoval:

Ing. Petr Plíva, CSc. (*petr.pliva@vuzt.cz*)

Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i.

Drnovská 507, 161 01 Praha 6

Posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy vypracovala:

Ing. Michaela Budňáková (*michaela.budnakova@mze.cz*)

Ministerstvo zemědělství ČR (oddělení zemědělských vstupů)

Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

## **9. Dedikace**

„Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. QK1910095 s názvem: Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“.

## **10. Ostatní náležitosti certifikované metodiky:**

V souladu se závazným „*Postupem pro uznání výsledků typu „ $N_{met}$  – Metodika*“, který vydalo Ministerstvo zemědělství – Odbor vědy, výzkumu a vzdělávání dne 1. února 2021, jsou v následujících podkapitolách uvedeny další požadované údaje nebo doplňující informace.

### **Podíly na vzniku předkládané metodiky**

Na zpracování a finalizaci předkládaného výstupu projektu (certifikované metodiky) se členové řešitelského týmu s rolí spoluautorů metodiky zúčastnili níže uvedeným podílem: Pavel Švehla (50 %), Pavel Míchal (15 %), Kateřina Grambličková (15 %), Aleš Hanč (10 %), Alena Grasserová (5 %), Tomáš Cajthaml (5 %).

### **Osvědčení odborného orgánu státní správy**

Osvědčení o uznání certifikované metodiky vydalo Ministerstvo zemědělství ČR dne 24. 11. 2023 (osvědčení č.: MZE 63967/2023-13123).



*Název:* **Posuzování účinnosti odstranění mikropolutantů z odpadních vod zpracovaných metodou založenou na filtraci přes vrstvu vermikompostu**

Certifikovaná metodika

*Autoři:* **Ing. Pavel Švehla, Ph.D.  
Ing. Pavel Míchal, Ph.D.  
Ing. Kateřina Grambličková  
doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.  
Mgr. Alena Grasserová  
prof. RNDr. Tomáš Cajthaml, Ph.D.**

*Vydavatel:* **Česká zemědělská univerzita v Praze**

*Adresa vydavatele:* **Česká zemědělská univerzita v Praze  
Kamýcká 129, Praha – Suchdol, 165 00**

*Tiskárna:* **Provozně ekonomické fakulta – Reprografické studio  
Kamýcká 129, Praha – Suchdol, 165 00**

*Pořadí vydání:* **1. vydání**

*Rok vydání:* **2023**

*ISBN:* **978-80-213-3341-3**

*Náklad:* **40 výtisků**

*Počet stran:* **32**

*Doporučená cena:* **neprodejné**