

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů



Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Aleš Hanč a kol.



Praha 2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů



Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

Certifikovaná metodika byla schválena Ministerstvem zemědělství ČR,
Odborem rostlinných komodit pod č. j. MZE-61482/2022-13123

Aleš Hanč a kol.

Praha 2022

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu
NAZV QK1910095

Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

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

doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

Ing. Pavel Míchal, Ph.D.

RNDr. Petra Innemanová, Ph.D.*

Ing. Milan Hrčka

Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

*DEKONTA, a.s.

Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

Aleš Hanč a kol.

Vydání první, 2022

Vydala Česká zemědělská univerzita ve svém nakladatelství

Tisk: Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6 – Suchdol, www.powerprint.cz

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ ČZU v Praze

Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 – Suchdol

tel: +420 224 382 736

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

ISBN 978-80-213-3224-9

Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

Abstrakt

Čistírenský kal se vyznačuje velmi variabilním obsahem sušiny, neutrálním až mírně alkalickým pH, většinou vysokým obsahem N-NH_4^+ a dále úzkým poměrem C:N. Tyto a další vlastnosti potom ovlivňují jeho zpracování pomocí žížal. Certifikovaná metodika popisuje přístupy, které je vhodné zavést pro úspěšné vermikompostování čistírenského kalu. Jedná se o skladování a následné vermikompostování ve slabé vrstvě, snížení pH pomocí bioodpadů kyselého charakteru, oddělené umístění vermikompostovaného kalu a substrátu se žížalami tak, aby mohly žížaly do kalu samovolně přelézat, přidavek surovin (štěpka, sláma a dále obaly z nasávané kartonáže, které zatím nejsou v systémech vermikompostování široce využívány) a v neposlední řadě proces předkompostování (s intenzivním provzdušňováním nebo překopáváním), který předchází vlastnímu vermikompostování. Výše uvedené přístupy je vhodné a často nezbytné kombinovat.

Klíčová slova: Čistírenský kal; vermikompostování; přístupy; mikropolutanty

Optimal approaches to vermicomposting sewage sludge

Abstract

Sewage sludge is characterized by highly variable dry matter content, neutral to slightly alkaline pH, usually a high N-NH_4^+ content and a narrow C:N ratio. These and other properties then influence its processing by earthworms. The certified methodology describes the approaches that should be implemented for successful vermicomposting of sewage sludge. This involves storage and subsequent vermicomposting in a weak layer, decrease the pH value using acid biowaste, separate placement of the vermicomposted sludge and the substrate with earthworms so that the earthworms can spontaneously move into the sludge, the addition of raw materials (wood chips, straw and packaging made of moulded pulp which are not yet widely used in vermicomposting systems) and, last but not least, the pre-composting process (by intensive aeration or turning equipment), which precedes the vermicomposting itself. It is convenient and often necessary to combine the above approaches.

Key words: Sewage sludge; vermicomposting; approaches; micropollutants

Obsah

I. CÍL METODIKY	1
II. VLASTNÍ POPIS METODIKY	1
1. Vermikompostování – charakteristika, požadavky, systémy a význam	1
2. Vlastnosti čistírenského kalu	3
3. Vhodné technologické přístupy k vermikompostování čistírenského kalu	6
III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	31
IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY	32
V. EKONOMICKÉ ASPEKTY	32
VI. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY	34
VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE	36
VIII. JMÉNA OPONENTŮ A NÁZVY JEJICH ORGANIZACÍ	39
IX. DEDIKACE	39

+

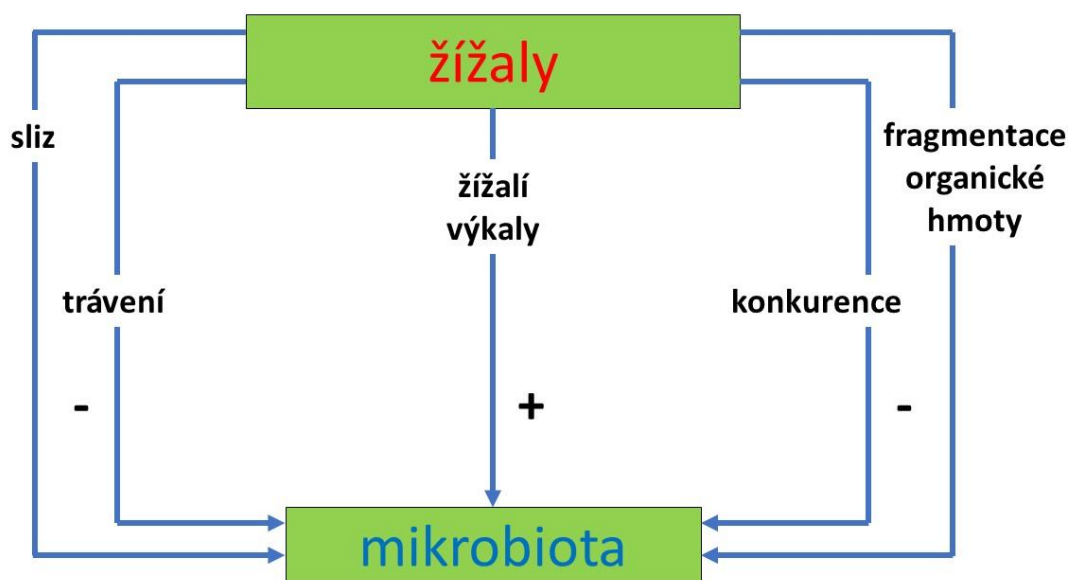
I. CÍL METODIKY

Cílem metodiky je definovat přístupy, které povedou k úspěšnému vermikompostování kalu z čistíren odpadních vod. Tyto přístupy byly ověřeny v rámci laboratorních a poloprovozních experimentů.

II. VLASTNÍ POPIS METODIKY

1. Vermikompostování – charakteristika, požadavky, systémy a význam

Vermikompostování je biooxidační a stabilizační proces přeměny organických materiálů, který využívá interakce mezi intenzivní činností žížal a mikroorganismů (Obr. 1).



Obr. 1: Kladné (+) a záporné (-) vlivy žížal na mikrobiální biomasu a její aktivitu

Průběh procesu je možno rozdělit na aktivní a dozrávací fázi. V aktivní fázi vermikompostování zabezpečují žížaly promíchávání, fragmentaci a aeraci (Gómez-Brandón a Domínguez, 2014). Dozrávací fáze se účastní již jen mikroorganismy. Žížaly se přesouvají do novější vrstvy bioodpadu (Aira et al., 2007). Délka obou fází se odvíjí od složení bioodpadu a druhu žížal (Domínguez et al., 2010).

Úspěšnost vermikompostovacího procesu je ovlivněna zejména těmito faktory:

Teplota – optimální teplota je kolem 20 °C

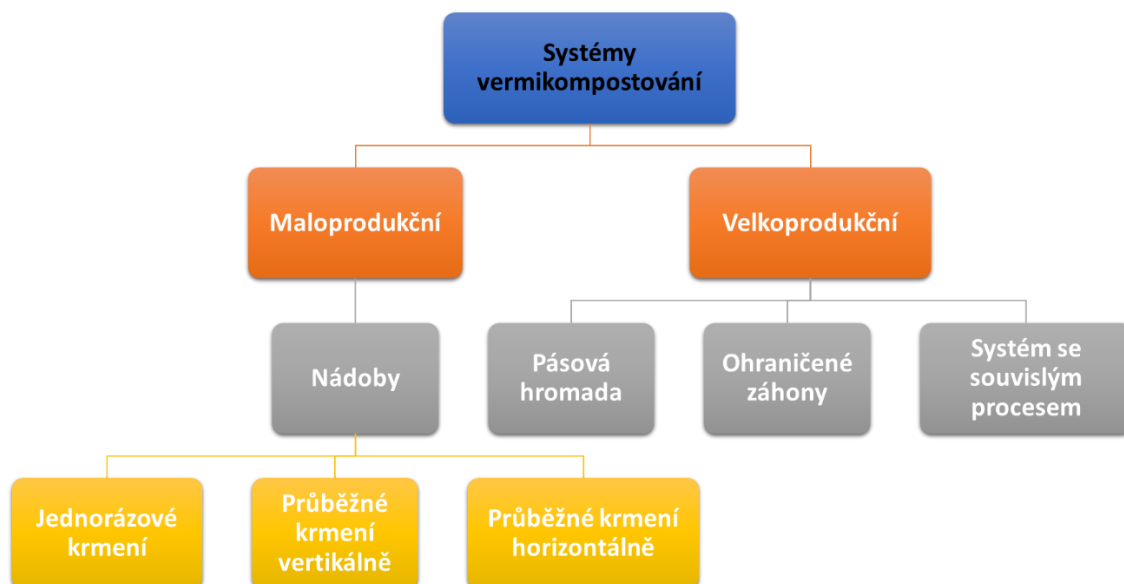
Vlhkost – ideální je kolem 80 %

Přístup vzduchu – žížaly dýchají celým povrchem těla

Hodnota pH - žížaly preferují neutrální hodnotu pH, avšak substrát s hodnotou pH v mírně kyselé oblasti (např. kuchyňský bioodpad, jablečné výlisky nebo matolína z vinné révy) pro ně nepředstavuje problém (Hanc et Pliva, 2013; Hanc et Chadimova, 2014; Částková et Hanč, 2019).

Druh surovin – mezi suroviny uplatnitelné jako substrát pro žížaly se dají zařadit např.: hnůj hospodářských zvířat, drůbeží trus, zbytky potravin, tráva, ovocné výlisky, separovaný digestát, použitý papír, sláma a ovoce (Plíva a kol., 2016). Do vermikompostovaných materiálů by se neměly ve zvýšené míře přidávat živočišné zbytky, tuky či mléčné výrobky (Sinha et al., 2008).

Nejčastěji používané vermikompostovací systémy jsou zobrazeny na Obr. 2. (Hanč a Hřebečková, 2019). Barevná schémata a postupy vermikompostování v jednotlivých systémech jsou uvedeny v certifikované metodice „Vermikompostování bioodpadů“ (Hanč et Plíva, 2013).



Obr. 2: Přehled systémů vermikompostování

Důvodem pro vermikompostování je lepší kvalita výsledného produktu ve srovnání s klasickým kompostem. Jedná se nejenom o kvalitativní znaky a obsahy živin uvedené v normě ČSN 46 5736 Vermikomposty, ale vermikompost vyrobený správně řízeným procesem vermikompostování vykazuje řadu dalších pozitivních vlastností:

- Zrnitostní složení – působením žížal dochází k výraznému snížení velikosti částic (Hanc et al., 2016)
- Mikroorganismy - Kováčik a Ryant (2019) uvádějí, že 1 g vermikompostu obsahuje 180 mil. bakterií, 2,8 mil. aktinomycet a 200 tis. hub

- Enzymy – vermikomposty vykazují vyšší enzymatickou aktivitu než komposty (Hanč et al., 2018)
- Huminové látky – vermikomposty obsahují kvalitní huminové látky (Hanc et al., 2019)
- Rostlinné růstové hormony – zejména se jedná o auxiny (3,8 ppm ve vermikompostu), jsou důležité pro prodlužovací růst a větvení kořenů, adsorpce některých zástupců auxinů na molekulách huminových kyselin (Canellas et al., 2015); gibereliny (2,75 ppm ve vermikompostu) – zajišťují stimulace klíčení a prodlužovací růst; cytokininy (1,05 ppm ve vermikompostu) – podpora pupenů, rozvětvení stonků, zpomalení stárnutí (Kováčik a Ryant, 2019)

2. Vlastnosti čistírenského kalu

Čistírenský kal obsahuje řadu cenných živin a z tohoto pohledu je předurčen k využití v rostlinné výrobě. Na druhou stranu je však v kalu obsažena pestrá škála různých rizikových látek, které se při aplikaci kalu na zemědělskou půdu dostávají do životního prostředí. Následně mohou vstupovat i do potravního řetězce a ohrozit lidskou populaci i další živé organismy. Při procesu čištění odpadních vod do kalu přechází řada látek typu endokrinních disruptorů, reziduí léčiv, PCB, PAU či těžkých kovů (Racz a Goel, 2010; Butkovskyi et al., 2016; Hanč, 2003). To je způsobeno zejména jejich sorpcí na pevné částice primárního či sekundárního kalu při mechanickém i biologickém čištění.

Vlastnosti čistírenských kalů jsou ovlivněny zejména:

- původem a vlastnostmi odpadní vody přitékající na čistírnu odpadních vod (připojení průmyslových podniků, nemocnice a jiná zdravotnická zařízení atd.)
- technologií čištění odpadní vody
- aplikací x absencí stabilizace kalu
- podmínkami procesu stabilizace kalu (anaerobní x aerobní, psychofilní x mesofilní x termofilní, pouze se zahuštěním x s odvodněním, případné dávkování flokulačních činidel, případná předúprava kalu či dodatečná úprava kalu atd.)

V rámci projektu NAZV QK1910095 „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“ jsme sledovali vybrané vlastnosti čistírenských kalů. Anonymizovaná Tab. 1a zobrazuje vybrané základní vlastnosti, obsahy vybraných prvků (Tab. 1b) a obsahy patogenních mikroorganismů (Tab. 1c) 26 vzorků čistírenských kalů odebraných z čistíren odpadních vod na území ČR v roce 2019. přičemž vybrané čistírny byly zvoleny tak, aby jejich velikost (vyjádřeno počtem

ekvivalentních obyvatel) pokrývala rozpětí všech velikostních kategorií na základě nařízení vlády č. 401/2015 „Nařízení vlády 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“.

Tab. 1a: Vybrané základní charakteristiky vzorkovaných čistírenských kalů

Parametr (koncentrační jednotka)	minimum	maximum	průměr + sm. o.
sušina (hmot. %)	12,1	36,7	19,7 ± 5,78
ztráta žiháním (% sušiny)	42,7	81,6	68,2 ± 8,78
pH (H ₂ O)	5,80	8,55	7,37 ± 0,84
TOC (%)	18,7	48,6	35,0 ± 7,03
AOX (mg/kg sušiny)	52	1 010	239 ± 217,2
Σ7 PCB (mg/kg sušiny)	0,05	0,10	0,07 ± 0,020
Σ12 PAU (mg/kg sušiny)	0,05	22,8	3,2 ± 4,48
Měrná vodivost (mS/m)	22,9	272,5	102,1 ± 64,71
N-NH ₄ ⁺ (mg/kg sušiny)	0,20	6 750	1 100 ± 1 900,0
N-NO ₃ ⁻ (mg/kg sušiny)	0,10	1 790	110 ± 350,0

Pozn.: pH a měrná vodivost se stanovila ve vodním výluhu v poměru čerstvých kalů:voda 1:5.

Tab. 1b: Celkové obsahy vybraných prvků ve vzorcích čistírenského kalu

Parametr (mg/kg suš.)	minimum	maximum	průměr + sm. o.
As	2,87	66,75	9,2 ± 11,91
Cd	0,36	8,64	1,4 ± 1,70
Cr	12,1	630,0	83,7 ± 148,5
Cu	95,9	1 510	259 ± 293
Hg	0,09	4,89	1,07 ± 0,91
Mo	1,53	52,75	7,59 ± 10,39
Ni	12,3	216	39,1 ± 49,3
Pb	11,3	332	42,2 ± 60,8
Zn	228	1 930	880 ± 410,04
P _{celk}	1 630	31 380	18 500 ± 7 740
Ca	14 200	84 670	29 950 ± 14 420
Mg	2 255	9 410	3 850 ± 1 370
K	2 095	9 975	3 690 ± 1 770
N _{celk}	3 775	65 900	19 880 ± 15 260

Tab. 1c: Mikrobiologické vlastnosti 26 odebraných vzorků čistírenského kalu

Parametr (koncentrační jednotka)	minimum	maximum	průměr + sm. o.
Heterotrofní bakterie (KTJ.g ⁻¹)	0,89 * 10 ⁷	8,60 * 10 ⁸	1,74 * 10 ⁸ ± 2,62 * 10 ⁸
Salmonella spp.	negativní	negativní	
Intestinální enterokoky (KTJ.g ⁻¹)	1,45 * 10 ³	5,65 * 10 ⁴	2,08 * 10 ⁴ ± 1,55 * 10 ⁴
Termotolerantní koliformní bakterie (KTJ.g ⁻¹)	165	4,50 * 10 ⁷	2,07 * 10 ⁶ ± 8,62 * 10 ⁶
Escherichia coli (KTJ.g ⁻¹)	100	1,75 * 10 ⁶	2,00 * 10 ⁵ ± 3,70 * 10 ⁵

Jak vyplývá z Tab. 1a a 1b, čistírenský kal se vyznačuje velmi variabilním obsahem sušiny (některé ze sledovaných kalů měly téměř kapalnou konzistenci), neutrálním až mírně alkalickým pH, většinou vysokou hodnotou N-NH₄⁺ a dále úzkým poměrem C:N. Tyto faktory činí proces vermikompostování kalu obtížným.

Tab. 2a: Obsah vybraných léčiv v testovaných vzorcích kalu

Parametr (μg/kg)	minimum	maximum	průměr + sm. o.
atenolol	10,0	10,0	10,0 ± 0,0
diklofenak	15,0	305	96,1 ± 75,90
gabapentin	10,0	513	68,6 ± 107,0
hydrochlorothiazid	15,0	137	62,2 ± 32,10
chlorhexidin	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
ibuprofen	28,3	330	75,4 ± 66,40
karbamazepin	10,0	150	49,9 ± 37,00
ketoprofen	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
kofein	13,3	2 150	207,7 ± 430,2
metoprolol	10,0	108	38,2 ± 26,5
naproxen	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
paracetamol	25,0	86,7	54,0 ± 20,00
sacharin	113	113	113 ± 0,00
sulfamethazin	10,0	11,7	10,8 ± 0,80
sulfamethoxazol	15,0	30,0	22,1 ± 5,80
sulfanilamid	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
sulfapyridin	5,0	193	53,2 ± 51,8
tramadol	7,5	340	60,6 ± 71,00
triclosan	75,0	873	289,3 ± 217,70
omeprazol	12,5	631	96,4 ± 163,70
cetirizin	10,0	58,3	32,0 ± 11,90
trimetoprim	10,0	160	58,9 ± 54,00

Bylo potvrzeno, že obsah různých mikropolutantů v čistírenském kalu může být překážkou pro jeho racionální využití v zemědělství a že v případě záměru využít cenné látky

obsažené v kalu bude zapotřebí hledat vhodné cesty k eliminaci mikropolutantů. V Tab. 2a a 2b jsou uvedeny minimální, maximální a průměrné koncentrace zjištěné v testovaném souboru 26 vzorků.

Tab. 2b: Obsah vybraných endokrinních disruptorů v testovaných vzorcích kalu

Parametr (µg/kg)	minimum	maximum	průměr
17 α -estradiol	10,3	23,8	15,6 ± 5,90
17 β -estradiol	7,54	33,4	20,5 ± 12,90
bisfenol A	84,0	47 050	2 500 ± 8 750
bisfenol F	5,34	141	26,3 ± 29,40
bisfenol S	1,20	100	11,8 ± 20,00
daidzein	2,90	165,8	30,8 ± 39,00
equilin	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
(R,S)-equol	0,97	1 420	83,2 ± 269,70
estriol	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
estrone	2,26	51,4	18,6 ± 14,70
17 α -ethinylestradiol	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
genistein	3,28	74,7	17,1 ± 15,30
19-norethindrone	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
D(-)-norgestrel	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno
α-zearalenol	nedetekováno	nedetekováno	nedetekováno

Vedle již zmíněného důvodu pro vermikompostování - lepší kvalita vermikompostu než kompostu, je dalším důvodem možnost snížení obsahu některých polutantů a mikropolutantů. Výsledky zahraničních studií naznačují, že žížaly mají schopnost akumulovat, resp. degradovat, mimo jiné i těžké kovy, endokrinní disruptory či zbytky léčiv (He et al., 2016; Rorata et al., 2017; Sidhu et al., 2019). Využití vermikompostování pro zpracování kalu však může bránit citlivost žížal vůči různým látkám.

3. Vhodné technologické přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

Vermikompostování čistírenského kalu má svá specifika. V rámci našich laboratorních a poloprovozních pokusů jsme ověřili níže uvedené technologické přístupy, které mohou zlepšit proces vermikompostování čistírenského kalu.

3.1 Skladování ve slabé vrstvě

Potenciální překážkou zdárné realizace vermikompostování materiálu obsahujícího čistírenský kal je vysoký obsah amoniakálního dusíku v kalu. V závislosti na pH a na dalších faktorech může při vermikompostování kalu docházet k úhynu žížal v důsledku toxického

působení amoniaku. Koncentraci N-NH₃ (c(N-NH₃)) je při znalosti celkové koncentrace N-amon (c(N-amon)), hodnoty pH a teploty ve °C (T) možno přibližně vypočítat dle následující rovnice:

$$c(N - NH_3) = \frac{c(N-amon) \cdot 10^{pH}}{\exp\left(\frac{6334}{273+T}\right) + 10^{pH}}$$

Z této rovnice je zřejmé, že toxicita N-amon vůči živým organismům je kromě jeho celkové koncentrace také silně závislá na aktuální hodnotě pH a na teplotě. Důvodem této skutečnosti je vliv pH a teploty na zastoupení disociovaného NH₄⁺ a nedisociovaného volného NH₃ v rámci celkové koncentrace N-amon, která zahrnuje obě formy. Toxicky zpravidla působí nedisociovaná forma (N-NH₃). Její zastoupení při dané celkové koncentraci N-amon roste s rostoucí hodnotou pH a s rostoucí teplotou.

Za účelem posouzení schopnosti žížal přežívat v materiálu obsahujícím čistírenský kal charakteristický vysokým obsahem N-amon byl proveden experiment simulující vermikompostování anaerobně stabilizovaného kalu ve směsi se zahradním bioodpadem. Vybrané vlastnosti použitých surovin jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Vybrané agrochemické parametry použitého čistírenského kalu a zahradního bioodpadu (prvky jsou uvedeny v sušině)

	čistírenský kal	zahradní bioodpad
sušina (hmot. %)	35,1	46,5
ztráta žíháním (% sušiny)	49,0	87,9
pH/H ₂ O	7,8	6,5
vodivost (mS/cm)	0,9	3,4
N _{celk} (%)	2,7	1,8
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	1324	607
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	6,1	311
P _{celk} (%)	1,8	0,1
K _{celk} (%)	0,5	1,2

V rámci pokusu bylo vytvořeno pět variant těchto materiálů (varianta 1 – kal a bioodpad v objemovém poměru 1:1 - bez žížal; varianta 2 – zahradní bioodpad bez přídavku kalu - s žížalami; varianta 3 - kal a bioodpad v objemovém poměru 1:1 - s žížalami; varianta 4 – kal a bioodpad v objemovém poměru 3:1 - s žížalami; varianta 5 – kal bez přídavku zahradního bioodpadu – s žížalami). Všechny varianty byly předkompostovány po dobu 2 týdnů v tepelně izolovaných kompostérech se spodním provzdušňováním (5 minut každou půlhodinu v objemu 4 L/min), kromě varianty 5, neboť samotný anaerobně stabilizovaný kal se výrazně nezahřívá a nedochází zde k termofilní fázi. Suroviny v objemu 13 L byly smíchány se 3 L substrátu

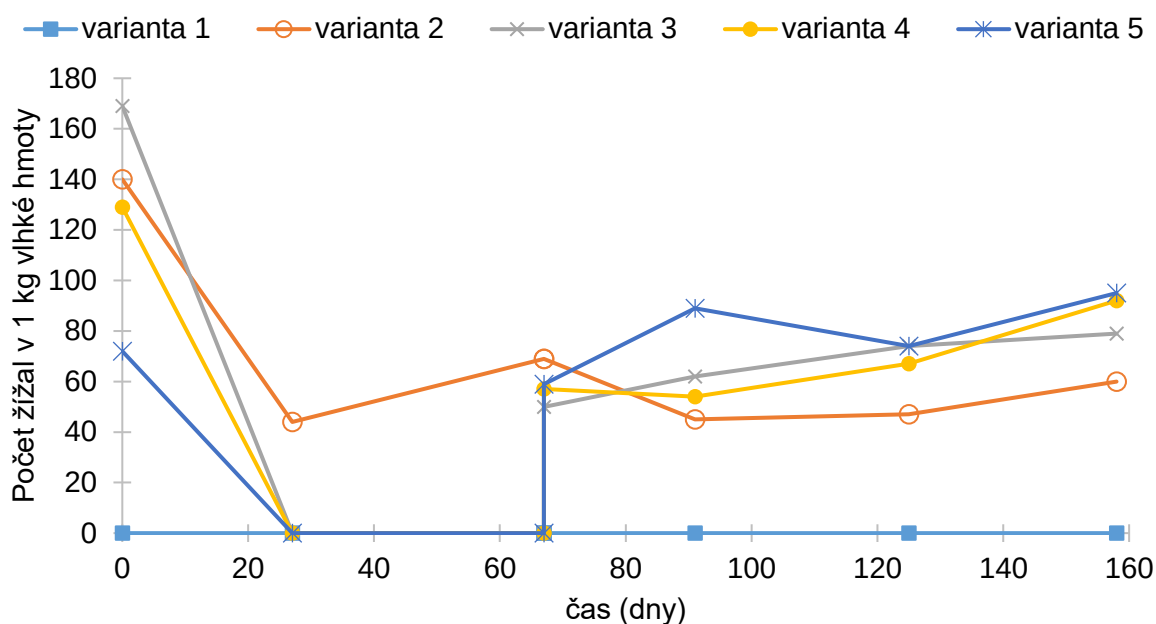
obsahujícím žížaly rodu *Eisenia* v počtu 200 ks/L. Vermikompostování probíhalo v plastových vermikompostovacích miskách o rozměrech 40 x 40 x 18 cm, které byly umístěny na kovové konstrukci (viz Obr. 1).



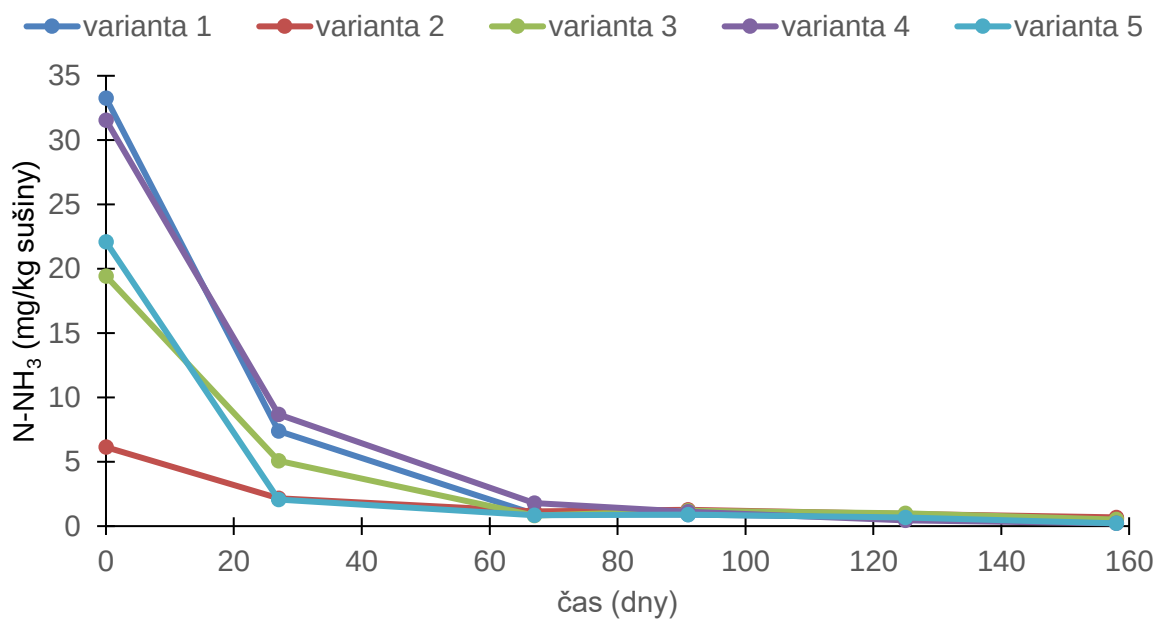
Obr. 1: Vermikompostování čistírenského kalu a jeho směsí se zahradním bioodpadem
v miskách

Sledováním bylo zjištěno, že již po několika hodinách začalo docházet k úhynu žížal ve všech variantách obsahujících čistírenský kal a žížaly (varianty 3 – 5). Po 67 dnech došlo k přidání nových žížal k vermikompostovanému materiálu obsahujícímu čistírenský kal. Žížaly již byly schopné v materiálu bez větších problémů přežít.

Graf 1: Počet žížal v průběhu vermikompostování



Graf 2: Koncentrace N-NH₃ v průběhu vermikompostování



Z grafu 1 je možno učinit předpoklad, že důvodem ke změnám v toleranci žížal vůči zpracovávanému substrátu jsou silné změny v koncentraci volného amoniaku v substrátu spočítané na základě níže uvedeného vzorce. Zatímco na začátku vermikompostování (den 0) dosahovala koncentrace N-NH₃ ve variantách obsahujících čistírenský kal (varianty 1, 3, 4, 5) 19 – 33 mg/kg, po 67 dnech, kdy byly přidány další žížaly, již nepřevyšovala 2 mg/kg.

Důvodem tohoto poklesu bylo patrně převedení části N-amon na N-NO_3^- v důsledku nitrifikace, úbytek N-amon v důsledku tékání amoniaku a změna v pH zpracovávaného materiálu.

Průběh přeměn sloučenin dusíku při vermikompostování však patrně bude velice variabilní v závislosti na původu čistírenského kalu, resp. na podmínkách, při kterých kal vznikl. Například kal, který prošel aerobní stabilizací kalu, nemusí obsahovat na počátku vermikompostování příliš vysoké koncentrace amoniakálního dusíku, který je v aerobních podmínkách stabilizace převáděn v důsledku nitrifikace na N-NO_3^- . Na druhou stranu nelze v těchto případech vyloučit přechodný nárůst koncentrace N-amon v průběhu vermikompostování. Ten může být způsoben mineralizací organického dusíku obsaženého v kalu a pozorován může být zejména v případě omezené dostupnosti kyslíku ve vermikompostovací zakládce. Nelze tedy vyloučit, že se toxický efekt amoniaku projeví nikoliv v první fázi kontaktu žížal s kalem, ale až později. Popsaný problém může být významný zejména v případě omezené účinnosti stabilizace kalu v případě aplikace aerobní, ale i anaerobní stabilizace kalu na čistírně odpadních vod (ČOV). Při zpracování nedokonale stabilizovaného kalu totiž může docházet k intenzivní mineralizaci organického dusíku až při vermikompostování takového kalu. Inhibiční vliv amoniakálního dusíku, resp. nedisociovaného amoniaku, se pak může projevit v důsledku vyšší rychlosti mineralizace organického dusíku na N-amon než je součet rychlostí odstranění N-amon nitrifikací a tékáním amoniaku do ovzduší. Následně pak může být N-amon v systému akumulován, což může znemožnit přežití žížal při vermikompostování.

Průběh popsaného experimentu naznačuje výhody předúpravy materiálu určeného k vermikompostování skladováním v tenké vrstvě. V průběhu tohoto skladování dojde v závislosti na podmínkách k poklesu obsahu N-amon v důsledku tékání amoniaku a průběhu nitrifikace. V tenké vrstvě dochází díky většímu specifickému povrchu zpracovávaného materiálu obsahujícímu čistírenský kal k intenzivnějšímu kontaktu materiálu s okolním vzduchem. Tékání amoniaku je tedy intenzivnější. Zároveň je za těchto podmínek ulehčen přístup kyslíku do materiálu, čímž je podpořen nitrifikační proces. Teprve po proběhnutí skladování materiálu za popsaných podmínek může být zahájen proces vermikompostování tím, že budou vhodným způsobem k materiálu přidány žížaly. V rámci popsaného pokusu byly vhodné podmínky pro žížaly dosaženy po 2 měsících skladování kalu a jeho směsí při výšce vrstvy max. 18 cm. Při vyšší vrstvě by patrně došlo k prodloužení této doby. Naopak při slabší vrstvě by se doba zkrátila. V každém případě popsaný experiment vedl ke zjištění, že je vhodné před započítím vlastního vermikompostování provést skladování zpracovávaného materiálu v tenké vrstvě.

3.2 Snížení pH

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že koncentrace N-NH_3 je při dané koncentraci celkového N-amon ovlivněna hodnotou pH. Pro snížení koncentrace N-NH_3 za účelem snížení toxického vlivu kalu vůči žížalám je tedy jednou z možností snížení hodnoty pH substrátu obsahujícího čistírenský kal.

Z tohoto důvodu byl založen laboratorní experiment (viz Obr. 2), ve kterém byl použit čistírenský kal produkovaný v objektech ČOV s různým způsobem stabilizace kalu – anaerobně stabilizovaný kal (Kal 1) a aerobně stabilizovaný kal (Kal 2). Vzorky kalu z obou zdrojů byly zpracovávány v různém poměru ve směsi se slaměnými peletami. Substrát pro vermikompostování byl za účelem snížení inhibičního vlivu NH_3 na žížaly okyselen přidavkem 0,3 M H_2SO_4 , přičemž původním záměrem bylo ve zpracovávaném materiálu dosáhnout hodnoty pH 7, resp. 6. Vzhledem k tomu, že hodnota pH kalu 1 přesahovala 8, byly u tohoto kalu realizovány také testy s cílovou hodnotou pH 8. Dávka kyselého roztoku potřebná k dosažení požadované hodnoty pH pro daný kal byla stanovena na základě výsledků předem provedených testů, při kterých byl sledován vývoj pH při dávkování kyseliny ke vzorku testovaného materiálu o hmotnosti 10 g. V rámci vlastního experimentu pak bylo ke vzorkům na základě výsledků těchto testů dávkováno množství kyseliny adekvátní hmotnosti vzorku. Po 47 dnech experimentu bylo provedeno sčítání žížal v jednotlivých vzorcích za účelem zjištění jejich schopnosti přežít v prostředí zpracovávaného materiálu.

Vybrané základní charakteristiky použitého kalu jsou prezentovány v tabulce 4, vlastní schéma experimentu pak v tabulce č. 5.

Tab. 4: Vybrané základní charakteristiky čistírenských kalů použitých při experimentu

	Kal 1	Kal 2
sušina (hmot. %)	25,1	15,6
ztráta žíháním (% sušiny)	58,0	71,1
pH	8,30	7,62
TOC	268 000	382 790
N-NH_4^+ (mg/kg suš.)	6 741	2,4
N-NO_3^- (mg/kg suš.)	100	6,7
vodivost (mS/m)	82,6	39,5



Obr. 2: Baňky s kalem a směsmi kalu a pelet umístěných ve vlhkém písku

Tab. 5: Schéma vermikompostovacího experimentu

Varianta	Typ kalu	Složení		pH		Varianta	Typ kalu	Složení		pH	
		% kalu	% pelet	požadované	skutečné			% kalu	% pelet	požadované	skutečné
1	Kal 1	0	100	6,0	7,7	16	Kal 2	0	100	6,0	7,5
2	Kal 1	25	75	6,0	6,5	17	Kal 2	25	75	6,0	7,2
3	Kal 1	50	50	6,0	6,9	18	Kal 2	50	50	6,0	7,0
4	Kal 1	75	25	6,0	7,2	19	Kal 2	75	25	6,0	7,0
5	Kal 1	100	0	6,0	6,9	20	Kal 2	100	0	6,0	6,9
6	Kal 1	0	100	7,0	7,1	21	Kal 2	0	100	7,0	7,9
7	Kal 1	25	75	7,0	7,0	22	Kal 2	25	75	7,0	7,6
8	Kal 1	50	50	7,0	7,2	23	Kal 2	50	50	7,0	7,1
9	Kal 1	75	25	7,0	7,1	24	Kal 2	75	25	7,0	7,3
10	Kal 1	100	0	7,0	7,3	25	Kal 2	100	0	7,0	7,2
11	Kal 1	0	100	8,0	7,8						
12	Kal 1	25	75	8,0	7,2						
13	Kal 1	50	50	8,0	7,2						
14	Kal 1	75	25	8,0	7,2						
15	Kal 1	100	0	8,0	7,9						

Dosažení požadované hodnoty pH (6, 7, resp. 8) po přidavku kyselého roztoku na základě výsledků předem provedených testů se vzorkem testovaného materiálu o malé hmotnosti (viz výše) se ukázalo jako velice problematické. Reálná hodnota pH ve vzorcích s požadovanou hodnotou 6,0 se pohybovala mezi 6,9 a 7,7 (tab. 5). U vzorků s požadovanou hodnotou pH 7,0 pak bylo dosaženo hodnot v rozmezí 7,0 – 7,9. Důvodem je patrně pufrční schopnost použitého materiálu, která má vzhledem ke komplikované chemické struktuře materiálu pozvolný účinek a nestačila se v plné míře projevit v rámci předběžného testu s malou hmotností vzorku. V každém případě ale bylo v zásadě dosaženo stavu, kdy ve vzorcích s požadovanou hodnotou pH 6 byly zaznamenány nižší hodnoty než u vzorků s požadovanou hodnotou 7, resp. 8. Přes nastíněné problémy tak bylo možno výsledky testu použít k posouzení vlivu nedisociovaného amoniaku na mortalitu žížal.

Z vývoje počtu žížal ve vzorcích během vermikompostovacího procesu je zřejmé, že u variant, ve kterých byl použit pouze Kal 1 (100% zastoupení kalu bez přidavku pelet), došlo k úhynu všech žížal (viz Tab. 6). K úhynu všech žížal dále došlo při přidání 50, resp. 75 % čistírenského kalu 1, i při v podstatě neutrální počáteční hodnotě pH 7,2. Podmínky pro život žížal tak byly v těchto variantách zcela nevyhovující. Z naměřených hodnot je zřejmé, že koncentrace amoniakálního dusíku přesáhly v těchto vzorcích 1 320 mg/kg suché hmoty, respektive koncentrace volného amoniaku přesáhly hodnotu 9,80 mg/kg suché hmoty. Z tabulky 6 je zároveň zřejmé, že prakticky ve všech případech, kdy byl zaznamenán obsah volného amoniaku vyšší než 10 mg/kg suché hmoty došlo k úhynu všech žížal, popřípadě jejich významné části. Naopak, při koncentraci nižší než 1 mg/kg došlo ve většině případů dokonce k nárůstu počtu žížal. Zdá se tedy, že inhibiční vliv na žížaly nevykazuje primárně zvýšená koncentrace N-amon, ale zvýšená koncentrace NH_3 . Při posuzování možnosti aplikovat vermikompostování jakožto postup zpracování daného organického materiálu obsahujícího čistírenský kal, je tedy nutno sledovat nejen celkovou koncentraci N-amon, ale také aktuální hodnotu pH a teplotu ve vermikompostovací základce. K podobnému závěru vedou i výsledky starších prací (Míchal a kol., 2019), které naznačují, že limitní koncentrace volného amoniaku vůči žížalám se nachází v rozmezí 19 – 33 mg/kg. NH_3 vykazuje zvláště silný inhibiční efekt nejen vůči žížalám, ale i vůči řadě dalších organismů (Hill et al., 2013; Anthonisen et al., 1976; Ip et al., 2001).

Při porovnání Kalu 1 a Kalu 2 je patrné, že u Kalu 2 a směsí s peletami nedošlo k úhynu či úbytku počtu žížal ve sledovaných variantách. To je patrně způsobeno tím, že koncentrace volného amoniaku u těchto variant (Varianty 16 až 25) nepřekročila 1,4 mg/kg při koncentraci N-amon nepřevyšující 95 mg/kg. Řádově vyšší koncentrace N-amon (ale i NH_3) v kalu 1 oproti

kalu 2 na počátku vermikompostovacího procesu byla patrně způsobena tím, že N-amon byl v kalu nahromaděn při jeho efektivní anaerobní stabilizaci v důsledku mineralizace organického dusíku obsaženého v surovém kalu (Dohányos et al., 1998). U Kalu 2 zpracovaného aerobní stabilizací mohlo v aerobních podmínkách tohoto procesu docházet k průběžné transformaci N-amon na N-NO_3^- v důsledku nitrifikace. Není také vyloučeno, že mineralizace organické hmoty nebyla u tohoto kalu dostatečně efektivní a velký podíl N zůstával v podobě N_{org} . Tomu nasvědčuje i velice vysoká koncentrace N-amon na konci vermikompostovacího procesu ve variantách 20 a 25 (až 1 470 mg/kg). V těchto případech mineralizace N patrně proběhla až v důsledku vermikompostovacího procesu. V každém případě je zajímavé, že ani v těchto případech nenastal úhyn žížal. I zde se jeví jako klíčová skutečnost, že díky relativně nízké hodnotě pH dosahující na konci experimentu 6,2 pro variantu 20 a 6,1 pro variantu 25 byla v systému poměrně nízká koncentrace NH_3 dosahující 1,00, resp. 0,80 mg/kg. To tedy opět potvrzuje zásadní roli NH_3 jakožto inhibitoru vůči žížalám.

Tab. 6: Vývoj počtu žížal a koncentrace amoniakálního dusíku a volného amoniaku na počátku a na konci experimentu (v mg/kg suché hmoty)

Varianta	Počet žížal na konci experimentu	pH po úpravě	N-amon (mg/kg)	N- NH_3 (mg/kg)	pH na konci	N-amon (mg/kg)	N- NH_3 (mg/kg)
		počátek experimentu			konec experimentu		
1	nárůst	7,7	8,50	0,20	6,4	133	0,20
2	stagnace	6,5	480	0,70	6,4	182	0,20
3	nárůst	6,9	1440	6,20	7,1	203	1,10
4	úbytek	7,2	4330	31,9	6,7	165	0,40
5	úhyn	6,9	5710	22,3	6,5	165	0,30
6	nárůst	7,1	23,6	0,20	6,8	153	0,50
7	nárůst	7,0	770	3,90	7,3	227	2,00
8	stagnace	7,2	1900	14,8	7,4	278	3,40
9	úbytek	7,1	2610	17,5	7,1	236	1,30
10	úhyn	7,3	6360	56,6	7,1	718	4,80
11	úbytek	7,8	130	4,10	6,6	114	0,30
12	nárůst	7,2	660	4,80	7,1	81,9	0,50
13	úhyn	7,2	1320	9,80	6,8	121	0,40
14	úhyn	7,2	1780	14,9	7,2	112	0,80
15	úhyn	7,9	6320	231	7,1	104	0,60
16	nárůst	7,5	18,1	0,30	7,1	10,9	0,10
17	nárůst	7,2	95,0	0,70	6,8	13,4	0,04
18	nárůst	7,0	72,7	0,40	6,9	24,8	0,10
19	nárůst	7,0	23,7	0,10	6,3	96,2	0,10
20	nárůst	6,9	43,1	0,20	6,2	1390	1,00
21	stagnace	7,9	10,5	0,40	7,5	15,4	0,20
22	nárůst	7,6	70,9	1,40	7,2	20,3	0,20
23	stagnace	7,1	47,7	0,30	6,0	45,5	0,02
24	nárůst	7,3	46,2	0,50	6,9	71,1	0,30
25	nárůst	7,2	57,9	0,40	6,1	1470	0,80

Nárůst koncentrace N-amon v uvedených variantách naznačuje určité riziko, že v případě vermikompostování nedostatečně stabilizovaného čistírenského kalu může toxický efekt NH_3 nastat v důsledku tvorby N-amon mineralizací až v průběhu vermikompostovacího procesu bez ohledu na potenciálně nízké koncentrace N-amon v okamžiku zahájení vermikompostování.

Na základě výše popsaných výsledků provedených experimentů je možno učinit závěr, že pokles koncentrace volného amoniaku vyvolaný úpravou pH zpracovávaného materiálu může v závislosti na podmínkách vermikompostovacího procesu zlepšit schopnost žížal přežít v prostředí obsahujícím čistírenský kal, a tím umožnit efektivnější průběh vermikompostování čistírenského kalu. Je zřejmé, že v praxi není z různých důvodů (ekonomická náročnost, environmentální dopady atd.) vhodné docílit úpravy pH přidavkem roztoku kyseliny do zpracovávaného materiálu. Řešením však může být míchat před zahájením vermikompostovacího procesu čistírenský kal s jinými materiály kyselého charakteru, např. kuchyňským bioodpadem, matolinou či jablečnými výlisky.

3.3 Oddělené umístění kalu a žížalího substrátu

Standardním postupem při vermikompostování je přidat hmotu obsahující dostatečné množství žížal přímo do materiálu, který má být vermikompostováním zpracován. V případě kalu však při aplikaci tohoto postupu narážíme na problém, že žížaly mohou být v momentu jejich vnesení do systému vystaveny silnému toxickému vlivu způsobenému látkami obsaženými v čistírenském kalu. Příkladem takové látky může být amoniakální dusík, resp. nedisociovaný amoniak (viz předcházející kapitola). Dalším postupem, který eliminuje mortalitu žížal, tak může být oddělené umístění zpracovávaného materiálu a hmoty obsahující žížaly (žížalího substrátu). V takovém případě žížaly migrují do zpracovávaného materiálu postupně a pouze v případě, že je pro ně prostředí vhodné. V laboratorním pokusu byl čistírenský kal, resp. jeho směs se slaměnými peletami, umístěn do 2/3 vermikompostovací misky a žížalí substrát na bázi matoliny z vinné révy do 1/3 (viz Obr. 3).

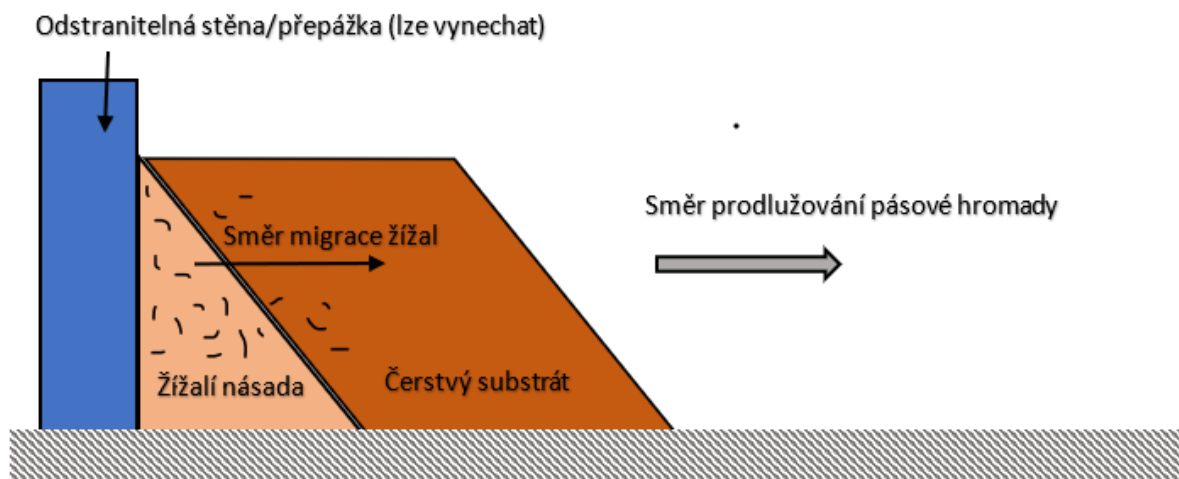


Obr. 3: Oddělené umístění matoliny s žížalami v sít'ovině (vlevo) a směsi kalu s peletami (vpravo)

Kvůli snadnějšímu odběru vzorků byl žížalí substrát umístěn do plastové sít'ky s průměry ok 6 mm, což umožnilo držet tento substrát odděleně a zároveň toto řešení nebránilo pohybu žížal mezi substrátem a zpracovávaným kalem. V případě vysokého obsahu amonného dusíku nebo jeho vyšší tvorby, či jiných nevhodných podmínek v průběhu vermikompostování měly žížaly možnost se stáhnout ze zpracovávaného kalu do původního substrátu. Tento jev byl pozorován zejména v prvních dnech na počátku 4- měsíčního vermikompostování. Po měsíci byla v kalu nalezena již přibližně 1/3 žížal dodaných v žížalím substrátu.

Koncept odděleného umístění žížalího substrátu a zpracovávaného materiálu lze v praxi provozovat jako tzv. „wedge systém“. Bioodpad, resp. kal s vylehčujícím materiálem zde není dávkován ve vrstvách na povrch substrátu, ale vedle sebe, takže pásová hromada – řádek vzniká postupně (viz Obr. 4). Žížaly pak do čerstvé zakládky migrují v horizontálním směru. Po určité době, která je závislá na hodnotách výše popsaných parametrů (pH, koncentrace amoniakálního dusíku), je nově přidaný materiál osídlen žížalami a lze pokračovat připojením čerstvé dávky. Po určité době je možné z počátečního bodu zakládky začít odebírat zralý vermikompost a vznikne tak jakási „krácející“ pásová hromada. Z tohoto důvodu je vhodné jednotlivé navážky

kalu viditelně označit, což usnadní následné vzorkování vzniklého vermikompostu a jeho odběr. Pokud by ke zpracování kalu žížalami docházelo přímo na zemědělském pozemku, bylo by možné část zakládky obsahující zralý vermikompost postupně rozhrnovat v okolí pásové hromady a postupovat dále napříč pozemkem.

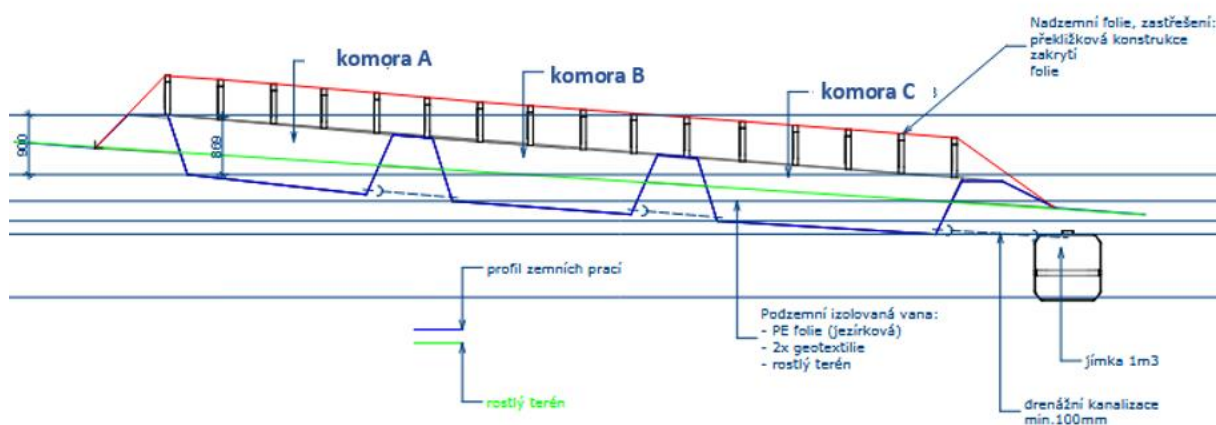


Obr. 4: Schéma zahájení vermikompostování v tzv. „wedge systému“

Experimentálně byl „wedge systém“ ověřen na lokalitě Hrbov (Lhenicko, Jižní Čechy). Na pozemku vermikompostárny FLORIUM, s.r.o. byl instalován tříkomorový polní vermikompostér (Obr. 5). Dvě komory označené A a B mají pracovní objem 3 m^3 a slouží k porovnání různých variant předúpravy kalu. Komora C o objemu $3,5 \text{ m}^3$ slouží jako záložní inokulum žížal. Polní vermikompostér je vybaven drenážním systémem, který odvádí vzniklý výluh do podzemní nádrže o objemu 1 m^3 (Obr. 6). Pokusný systém je částečně zapuštěn do terénu, což umožňuje komfortnější přezimování žížal (vzhledem k náročnější obsluze je při větších zpracovávaných objemech vhodnější počítat s umístěním zakládky na volné ploše, přezimování žížal je pak řešeno zajištěním dostatečného objemu zakládky a vhodným zakrytím v zimní sezóně).



Obr. 5: Polní vermikompostér na lokalitě Hrbov (vlevo) společně s násadou žížal (vpravo)



Obr. 6: Schéma pilotního tříkomorového vermikompostéru - boční řez

V prvním roce řešení byla jako vylehčující materiál použita sláma. Odvodněný, anaerobně stabilizovaný kal z ČOV střední velikosti (33 tis. EO), který prošel odvodněním a anaerobní stabilizací a dále byl smíchán společně se slámou a dávkován ve vrstvách. Hmotnostní poměr slámy a čistírenského kalu byl 1:4 v sušině. Do každé z komor pak byly umístěny perforované přepravky s násadou žížal o hmotnosti cca 7 kg na jednu komoru (Obr. 6). Po šesti týdnech již byla pozorována migrace žížal v okolí přepravek a po čtyřech měsících testu již došlo k osídlení celého objemu zakládky. Popsané uspořádání primárně sloužilo k namnožení dostatečného množství žížal (násady) pro následující experimenty, přesto byl materiál průběžně analyzován dle požadavků vyhlášky č. 437/2016 Sb. (nyní vyhláška č. 273/2021 Sb.). Dále byl sledován obsah nutrientů včetně forem dusíku a osud vybraných mikropolutantů ze skupiny farmak a endokrinních disruptorů. V závěru sezóny, kdy došlo vlivem činnosti žížal k významnému sesednutí hromady, byl vzniklý vermikompost (násada či

inokulum žížal) uspořádán do kompaktního tvaru o objemu cca 1 m³ u stěny každé z komor. Pro úspěšné přezimování inokula a zachování vlhkosti byl vermikompostér překryt polopropustnou plachtou. V následujícím roce byl tento materiál s výslednou hustotou žížal v desítkách až stovkách jedinců na litr použit jako základ pro testování tzv. „wedge systému“ (Obr. 7). Výsledky testu jsou detailněji popsány v publikaci Innemanová a kol. (2022).



Obr. 7: Jarní kontrola zazimovaného vermikompostéru a stav inokula po přezimování

Pro testování „wedge systému“ byla každá z komor A a B dodatečně rozdělena dvěma vertikálními přepážkami na tři segmenty o pracovním objemu 1 m³. První segment v každé komoře obsahoval žížalí násadu z předchozí sezóny. Perforovaná přepážka umožňuje horizontální migraci žížal do nově přidaného substrátu, ale zabraňuje jeho promíchání s původním vermikompostem, který slouží jako násada žížal (to je důležité v experimentálním režimu, v reálném provozu není použití přepážky nutné). Jako vylehčující materiál sloužila použitá dřevní štěpka. Jednalo se o nadsítnou frakci z kompostárny JENA.

Stabilizovaný kal z totožné ČOV, jako v předchozím roce experimentu, byl smíchán s dřevní štěpkou v objemovém poměru 1:1,5. Tento poměr byl zvolen na základě předchozí zkušenosti s biosušením čistírenských kalů (Pilnáček a kol., 2019), aby byl zajištěn spolehlivý průběh termické fáze u varianty s předkompostováním. Do pokusných komor polního vermikompostéru byl ve „wedge“ uspořádání přidán 1 m³ vzniklé směsi (komora B) a po čtyřech týdnech aktivní řízení aerace 1 m³ předkompostovaného materiálu, který prošel termickou fází s maximální dosaženou teplotou 60 °C (komora A). Část předkompostovaného materiálu (cca 0,5 m³) byla ponechána jako kontrola bez vlivu žížal. Kromě sledování rizikových látek podle aktuální legislativy a vybraných agrochemických parametrů, byl pomocí patron s vneseným potenciálním patogenem *E. coli* hodnocen hygienizační potenciál obou procesů. Průběh experimentu dokumentují Obr. 8. a 9.



Obr. 8: Rozdělení jedné z komor vermikompostéru perforovanými přepážkami (segment napravo obsahuje žížalí násadu z předchozí sezóny, v přepravce je připravena směs kalu se štěpkou pro umístění do prostředního segmentu)



Obr. 9: Ukázka rozmístění patron s indikátorovým patogenem *E. coli* (vlevo) a vzniklá vermikultura ve směsi kalu a štěpky (vpravo)

V následujících tabulkách 7, 8 a 9 jsou uvedeny výsledky stanovení sledovaných parametrů. Pro větší přehlednost jsou zde shrnuta pouze data získaná po šesti měsících experimentu. Pokud není uvedeno jinak, jedná se vždy o průměrné hodnoty a směrodatnou odchylku ze tří stanovení.

Tab. 7: Hodnoty rizikových látek v upravených kalech dle přílohy 38 Vyhl. 273/2021 Sb. po šesti měsících trvání experimentu ve variantách a) pouze vermikompostování (vermikompost), b) vermikompostování s předkompostováním (vermikompost s předkompostováním) a c) pouze kompostování (kompost)

Parametr (mg/kg)	vermikompost	vermikompost s předpokompostováním	kompost	Limit dle Přílohy 38 vyhl. č. 273/2021 Sb.
As	6,5 ± 0,1	5,9 ± 0,2	5,6 ± 1,0	30
Cd	0,8 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,7 ± 0,1	5
Cr	37,3 ± 0,9	34,7 ± 2,9	35,1 ± 3,5	200
Cu	154,4 ± 6,0	140,4 ± 2,8	153,3 ± 17,6	500
Hg	0,7 ± 0,1	1,2 ± 0,8	0,8 ± 0,4	4
Ni	26,0 ± 0,2	23,9 ± 0,2	23,2 ± 4,8	100
Pb	37,3 ± 1,2	34,1 ± 1,3	31,2 ± 3,8	200
Zn	561,9 ± 7,8	564,2 ± 32,2	485,3 ± 71,5	2500
Mo	4,7 ± 0,1	4,7 ± 0,3	4,4 ± 0,7	
AOX	118,5 ± 33,5	132,5 ± 7,5	136,0 ± 4,0	500
PCB	< m.d.	< m.d.	< m.d.	0,6
PAH	4,5 ± 4,1	6,3 ± 6,5	5,0 ± 1,9	10

m.d. - mez detekce

Tab. 8: Výsledky stanovení agronomicky významných parametrů po šesti měsících trvání experimentu ve variantách a) pouze vermikompostování (vermikompost), b) vermikompostování s předkompostováním (vermikompost s předkompostováním) a c) pouze kompostování (kompost)

Agronomicky významné parametry	vermikompost	vermikompost s předpokompostováním	kompost
pH	6,4 ± 0,1	6,9 ± 0,2	6,2 ± 0,0
Sušina (%)	30,3 ± 0,9	32,8 ± 1,5	40,4 ± 3,5
N _{celk} (%)	4 350 ± 130	4 250 ± 120	4 090 ± 470
N-NH ₄ ⁺ (mg/kg)	5,1 ± 0,9	5,9 ± 1,9	11,7 ± 2,6
N-NO ₃ ⁻ (mg/kg)	3 200 ± 160	2 600 ± 350	3 140 ± 570
P _{celk} (mg/kg)	26 200 ± 570	23 450 ± 1 650	25 070 ± 3 750
K (mg/kg)	8 790 ± 350	8 180 ± 350	8 960 ± 1 150
Ca (mg/kg)	24 900 ± 1 150	24 500 ± 2 200	23 870 ± 3 070
Mg (mg/kg)	4 700 ± 120	4 370 ± 70	4 370 ± 540
TOC (mg/kg)	270*10 ³ ± 30*10 ³	184*10 ³ ± 128*10 ³	250*10 ³ ± 20*10 ³
Ztráta žíháním (%)	64,4 ± 1,7	65,5 ± 1,7	55,8 ± 8,5
Vodivost (mS/m)	68,2 ± 1,7	65,7 ± 5,7	82,9 ± 5,7
C:N	74,2 ± 3,7	77,1 ± 3,9	68,0 ± 4,1
AT ₄ (mg O ₂ /g/4dny)	2,4 ± 0,1	4,3 ± 1,4	5,1 ± 0,2
Test klíčivosti (%)*	68,1 ± 8,5	72,1 ± 8,4	65,1 ± 4,3

* 72h test klíčivosti na semenech hořčice bílé (*Sinapsis alba*). Výsledek je uveden v % průměrné délky kořene vůči kontrole. Test je prováděn vždy na 30ti semenech ve dvou opakováních pro každý ze tří paralelních vzorků od každé varianty

Z uvedených výsledků vyplývá, že kaly upravené vermikompostováním, vermikompostováním s předkompostovací fází i samotným kompostováním splnily podmínky §61 vyhlášky. č. 273/2021 Sb. pro mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v upravených kalech a mikrobiologická kritéria pro použití upravených kalů na zemědělské půdě (přílohy 28 a 38 k této vyhlášce).

Při posuzování výsledného produktu z hlediska požadavků na výstupy ze zařízení určených k nakládání s biologicky rozložitelnými odpady dle přílohy 30 této vyhlášky lze navíc konstatovat, že z hlediska obsahu rizikových látek odpovídají výsledné komposty, resp. vermikomposty, Třídě II.

Z respiračního testu (stanovení AT₄) vyplývá, že nejméně stabilizovaný je materiál, který byl pouze kompostovaný. Ve srovnání s variantou, která byla pouze vermikompostovaná bez předkompostování, byl rozdíl v intenzitě respirace statisticky významný (p<0,05). Z výsledků testů klíčivosti vyplývá, že 6 měsíců je dostatečná doba pro dosažení kvality kompostu, resp. vermikompostu použitelného v zemědělství. Nicméně další stabilizace materiálu prodloužením doby zrání je vhodná.

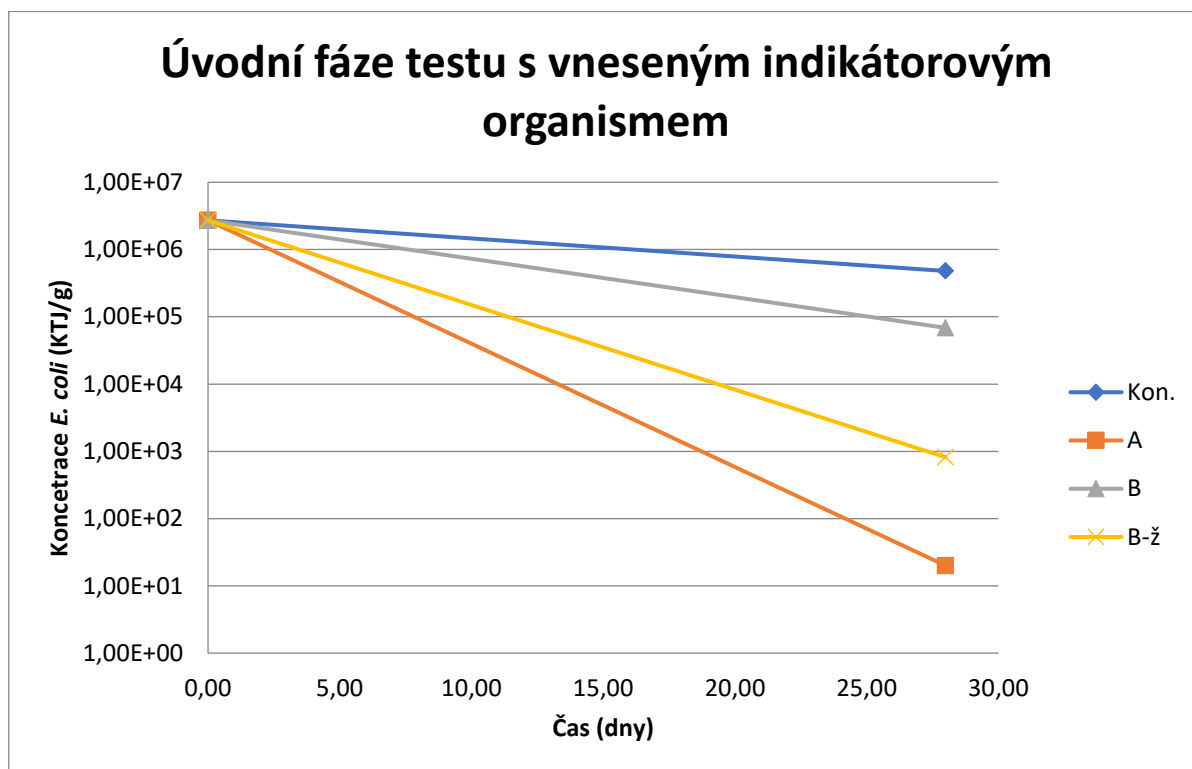
Tab. 9: Výsledky stanovení vybraných mikrobiologických ukazatelů vždy v pěti opakováních po šesti měsících trvání experimentu ve variantách a) pouze vermikompostování (vermikompost), b) vermikompostování s předkompostováním (vermikompost s předkompostováním) a c) pouze kompostování (kompost)

Mikrobiologické ukazatele	vermikompost	Vermikompost s předkompostováním	Kompost
Heterotrofní bakterie (KTJ/g)	$1,8 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$
	$2,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$
	$1,9 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^7$
	$1,8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^7$
	$2,1 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^7$
<i>Salmonella</i> spp.	negativní v pěti vzorcích	negativní v pěti vzorcích	negativní v pěti vzorcích
Intestinální enterokoky (KTJ/g)	$4,9 \cdot 10^2$	$5,6 \cdot 10^2$	$8,9 \cdot 10^2$
	$4,8 \cdot 10^2$	$4,8 \cdot 10^2$	$9,4 \cdot 10^2$
	$5,9 \cdot 10^2$	$4,5 \cdot 10^2$	$9,3 \cdot 10^2$
	$5,3 \cdot 10^2$	$5,6 \cdot 10^2$	$9,8 \cdot 10^2$
	$5,0 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^2$	$9,8 \cdot 10^2$
<i>E. coli</i>	pod mezí detekce v pěti vzorcích	pod mezí detekce v pěti vzorcích	pod mezí detekce v pěti vzorcích

KTJ - kolonie tvořící jednotka, * méně než 20 KTJ/g

Během vermikompostování nemůže docházet k termické hygienizaci, neboť žížaly nepřežijí teploty, které jsou běžné v termofilní fázi klasického kompostování. Proto je důležité sledovat mikrobiologické ukazatele. Monitoring mikrobiologických parametrů (tab. 9) dokazuje, že předkompostování s termickou fází nemá vliv na mikrobiologickou kvalitu výsledného kompostu, resp. vermikompostu. Materiál ve všech testovaných variantách splňoval pro šesti měsících pokusu kritéria kategorie I - kaly, které je možno obecně aplikovat na půdy využívané v zemědělství dle vyhlášky. č. 273/2021 Sb. To potvrdil i modifikovaný validační test s vneseným indikátorovým mikroorganismem *E. coli*. Po čtyřech týdnech trvání pokusu (tedy po ukončení předkompostovací fáze u) byl ještě patrný rozdíl v poklesu koncentrace *E. coli* u jednotlivých variant (Graf 3). K největšímu snížení koncentrace *E. coli* došlo vlivem termické fáze předkompostování (max. dosažená teplota 60°C). Ve variantě bez předkompostování, která byla po dobu prvních čtyř týdnů již vystavena působení žížal, pak došlo k výraznějšímu poklesu obsahu *E. coli* u patron umožňujících průnik žížal (B-ž). Nejmenší pokles byl pozorován u kontrolních vzorků, kdy byl obsah patrony ponechán v laboratorních podmínkách na uzavřených Petriho miskách jako kontrola. Tyto rozdíly již nebyly patrné po šesti měsících trvání experimentu, kdy došlo k poklesu obsahu *E. coli* o šest řádů ve všech variantách.

Graf. 3: Průměrná koncentrace uměle vneseného indikátorového organismu *E. coli* v po čtyřech týdnech trvání pokusu (po ukončení předkompostovací fáze u vzorků A). Označení B-ž představuje variantu, kdy obsah patrony byl vystaven působení žížal. U variant bez žížal byl nosič indikátorového organismu uzavřen navíc v inertní tkanině, která zabránila proniknutí žížal do patrony. Jedná se o průměrné hodnoty z 5 vzorků (patron).



Dále bylo pozorováno, že v poloprovozním měřítku již není možné spolehlivě stanovit průměrnou hustotu žížal v celém objemu zakládky. V polních podmínkách a větších objemech zakládky již dochází ke stratifikaci výskytu žížal, zejména vlivem aktuální vlhkosti. Lze konstatovat, že při použití štěpky je (na rozdíl od varianty se slámou) vermikompost více homogenní a nebyl pozorován výskyt anaerobních zón. Materiál má nicméně tendenci prosychat na povrchu a v těchto zónách je pak výskyt žížal minimální. Pokud by nebyl materiál mechanicky překopáván, je třeba předcházet prosychání pravidelným kropením, případně zakrytím zakládky fólií nebo například kartonem s vrstvou mulče.

3. 4 Přídavek surovin

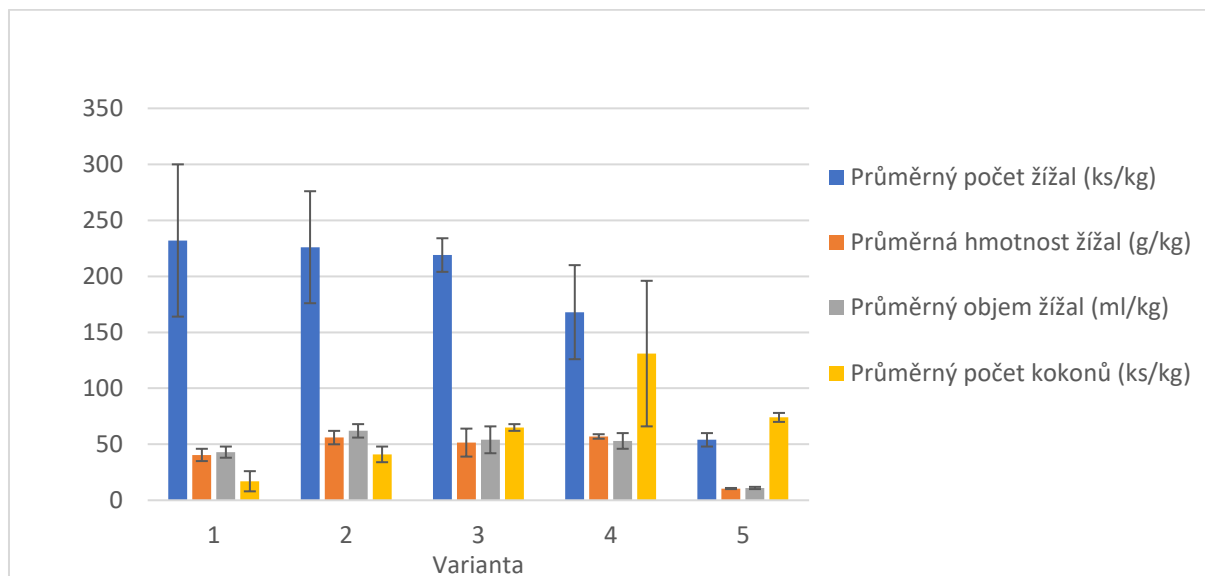
Čistírenský kal se vyznačuje nízkým poměrem C:N (přibližně 5.1). V mnoha případech má kal kašovitou konzistenci. Jak již bylo diskutováno v předchozích kapitolách, v čistírenském kalu mohou být obsaženy látky působící toxicky na žížaly, např. amoniakální dusík, resp. nedisociovaný amoniak. Zejména z těchto důvodů je vhodné před vermikompostováním přidat ke kalu další suroviny.

3.4.1 Přídavek slaměných pelet

Použití slaměných pelet bylo částečně popsáno v kap. 3.2. V jiném experimentu s vermikompostováním čistírenského kalu se zvyšujícím se zastoupením slaměných pelet (var. 2 = 25 %, var. 3 = 50 %, var. 4 = 75 % a var. 5 = 100 %) byly každý měsíc po dobu 4 měsíců odebírány vzorky a zjišťován počet, hmotnost a objem žížal a také počet kokonů.

Vliv přídavku pelet na celý proces vermikompostování lze nejlépe vysledovat z odběru po prvním měsíci (Graf 4). V tomto období byl nejvyšší průměrný počet žížal ve variantě 1 (232 kusů v kg vlhké hmoty) a byla zde patrná negativní korelace se zvyšujícím se zastoupením slaměných pelet. Tento jev mohl být způsoben zvyšujícím se poměrem C:N a momentálním nedostatkem živin přístupných pro žížaly kvůli pomalu se rozkládajícím peletám. Naopak počet kokonů stoupal se zvyšujícím se zastoupením pelet. Hmotnost i objem žížal v hmotě (biomasa žížal) byla nejvyšší ve směsích kalu a pelet (varianta 2, 3 a 4). Kal je tedy z pohledu množství biomasy žížal a počtu kokonů lepší vermikompostovat s přídavkem vhodného materiálu než bez tohoto přídavku.

Graf 4: Průběh průměrných hodnot počtu (ks/kg), hmotnosti (g/kg) a objemu žížal (ml/kg) a počtu kokonů (ks/kg) v jednotlivých variantách po prvním měsíci vermikompostování



(var. 1 = kal 100 %, var. 2 = kal 75 % a slaměné pelety 25 %, var. 3 = kal 50 % a slaměné pelety 50 %, var. 4 = kal 25 % a slaměné pelety 75 % a var. 5 = slaměné pelety 100 %)

3.4.2 Přídavek štěrky

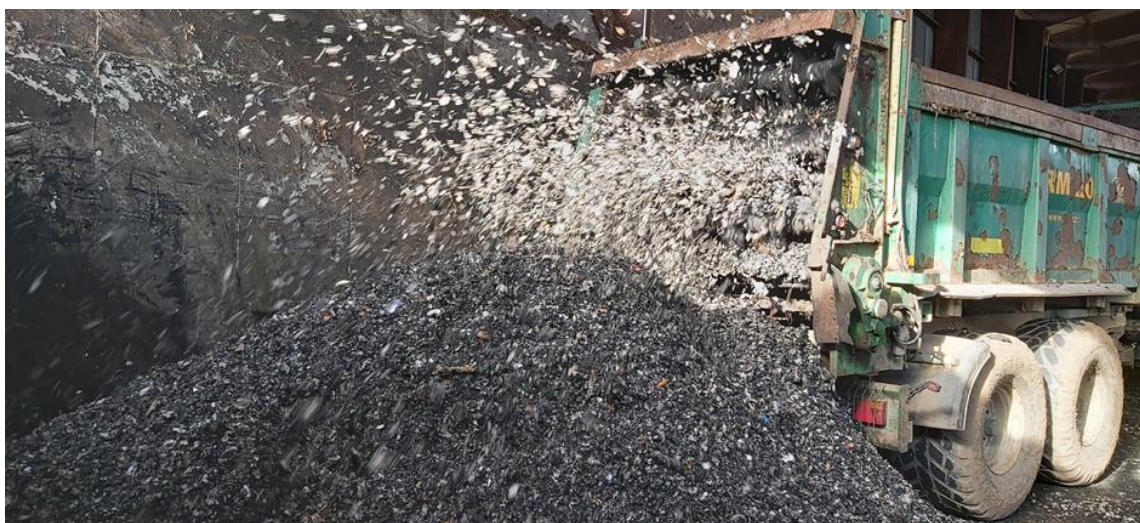
Použití štěrky jako vylehčujícího materiálu bylo popsáno v kapitole 3.3 u poloprovozního experimentu. Pokud se jedná o nadsítnou frakci po konečné úpravě kompostu nebo vermikompostu, lze štěrku použít jako vylehčující materiál opakovaně a uspořit tak provozní náklady spojené s předúpravou kalu. Protože dřevní štěrka zabraňuje výraznému slehnutí zakládky, je směs kalu a štěrky velmi rychle a rovnoměrně osídlena žížalami. Nedochází tak ke zpomalení procesu a potřebě mechanického překopání ztuhlých míst s převažujícími anaerobními podmínkami, jak to bylo pozorováno v případě použití surové slámy. Použití recyklované dřevní štěrky z kompostárny JENA vedlo po 6 měsících vermikompostování ke splnění všech legislativních požadavků pro použití upraveného kalu na zemědělské půdě, a to včetně dostatečné hygienizace i bez fáze předkompostování. V případě kompostářských parametrů dle normy ČSN 46 5736, byl překročen pouze ukazatel C:N. Pokud nebude nutné zařazení předkompostovací fáze, lze adekvátně snížit vstupní poměr kal: štěrka a docílit vyhovujícího poměru C:N ve výsledném produktu. Přesítování zralého vermikompostu umožní, kromě dalšího snížení C:N, znovuvyužití štěrky při přípravě nové zakládky.

3.4.3 Přídavek nasávané kartonáže

Nasávaná kartonáž se skládá z ekologicky šetrného materiálu pro obalové využití. Vyrábí se z odpadních papírů a vody. Je tedy biologicky rozložitelná. S nasávanou kartonáží se lze setkat hlavně v podobě tvarovaných fixací, jednorázových talířů, misek či tácků na ovoce, ale i v podobě dóz, či dokonce láhví. Největší objem výroby představují obaly na vajíčka – proložky jako převážně velkospotřebitelské balení a krabičky jako malospotřebitelské balení. Vzhledem k obsahu nulových vláken se nedají materiálově recyklovat a nabízí se jejich kompostování a vermikompostování. Navíc mají vysoký poměr C:N (300:1), čímž se hodí jako přídavek k čistírenskému kalu.

Nadrcené proložky od vajec byly použity v poloprovozním pokusu s vermikompostováním čistírenských kalů ze dvou čistíren odpadních vod, přičemž oba kaly byly anaerobně stabilizovány. Kal I pocházel z ČOV velikostní kategorie nad 10 tis. EO, Kal 2 pocházel z ČOV velikostní kategorie nad 100 tis. EO.

Proložky a kal byly smíchány pomocí malého čelního nakladače v hmotnostním poměru 1:2, čímž se dosáhlo optimálního poměru C:N (30:1) a směs byla dále homogenizována (Obr. 10).



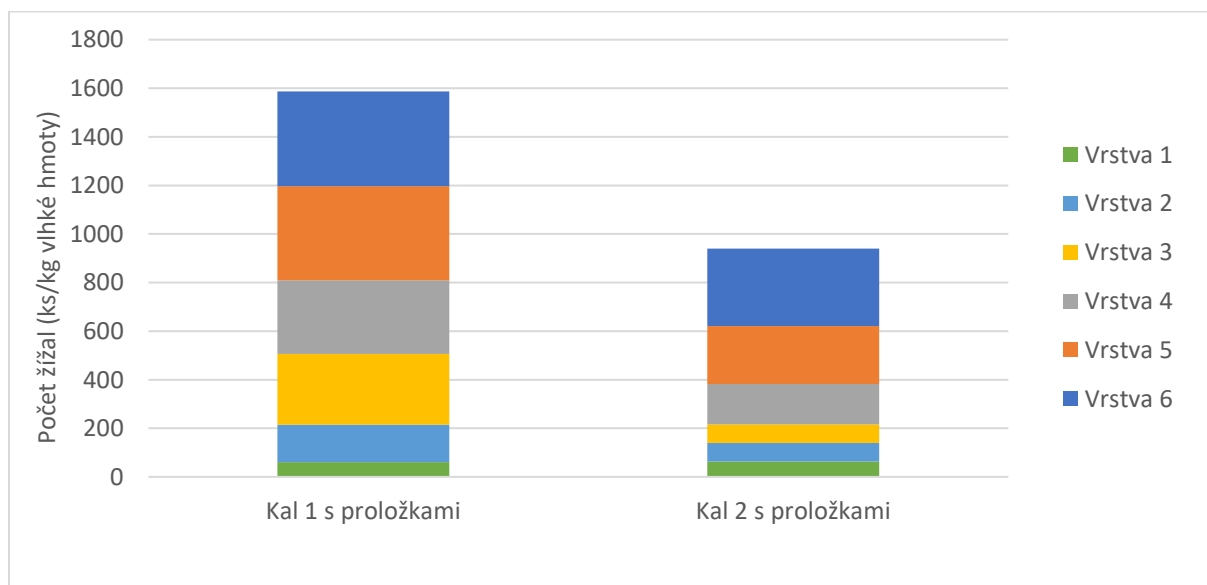
Obr. 10: Homogenizace směsi proložek a kalu

Předkompostovaný materiál byl použit k přikrmování žížal a to 1x za měsíc po dobu 6 měsíců ve vrstvě 15 cm. (Obr. 11). Přídavek nasávané kartonáže optimalizoval C:N a strukturu kalu. Navíc byl jako odpad smysluplně využit. Žížalám se v této směsi dařilo, jak vyplývá z grafu 5. V tomto systému průběžného krmení lezou žížaly do horních vrstev za novým krmivem. To je doloženo skutečností, že v horní vrstvě bylo přibližně 6x více žížal než ve vrstvě spodní.



Obr. 11: Vermikompostování směsi kalu s proložkami od vajec v betonových kójiích

Graf 5. Počet žížal ve vermikompostovaných vrstvách kalu s proložkami na konci experimentu (stáří vrstvy 1 je 7 měsíců a vrstvy 6 je 1 měsíc)



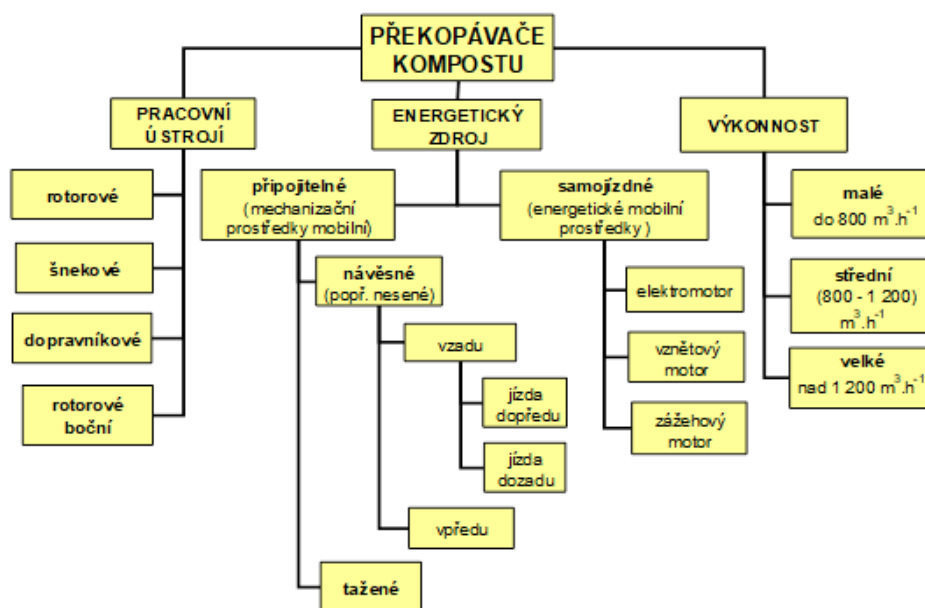
3.5 Předkompostování

V rámci jiného experimentu byly čistírenské kaly s přidavkem slaměných pelet předkompostovány ve speciálních kompostérech (Obr. 12). V rámci provzdušňování bylo dodáno 0,9 l vzduchu za hodinu na 1 kg počáteční směsi čerstvého bioodpadu (4 litry vzduchu za minutu po dobu 5 minut za každou uplynulou půl hodinu).



Obr. 12: Kompostéry s regulovatelným provzdušňováním

V pokusu s nasávanou kartonáží a kalem (kap. 3.4.3) byla směs po dobu 1 měsíce pravidelně 1x týdně překopávána pomocí malého čelního nakladače a také zavlažována k nahrazení úbytku odpařené vody. V praktických podmínkách je možno použít různé druhy překopávačů, jejichž rozdělení podle pracovního ústrojí, energetického zdroje, a výkonnosti je zobrazeno na Obr. 13.



Obr. 13: Rozdělení překopávačů kompostu

Na Obr. 14 je zobrazen malý samozídný překopávač v areálu ČOV do 10 tis. EO. Stroj je používán k předkompostování směsi čistírenského kalu a bioodpadu z údržby zeleně před vermikompostováním.



Obr. 14: Předkompostování směsi čistírenského kalu a bioodpadu z údržby zeleně před vermikompostováním v areálu čistírny odpadních vod

III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Vermikompostování je dobře zavedenou metodou zpracování různých odpadních materiálů organické povahy. Nicméně, vzhledem k tomu, že tento proces je závislý na aktivitě žížal, hrozí v některých případech problémy vyplývající z toxického, resp. inhibičního vlivu různých látek obsažených ve zpracovávaném materiálu na žížaly. Typickým příkladem potenciálně problematického materiálu je čistírenský kal.

Optimální přístupy ke zpracování čistírenského kalu s využitím vermikompostování nebyly v minulosti formou certifikované metodiky shrnuty. Jsou zde zmíněny postupy skladování a následného vermikompostování ve slabé vrstvě, snížení pH pomocí bioodpadů s nízkým pH, oddělené umístění vermikompostovaného kalu a substrátu se žížalami, přidavek surovin (štěpka, sláma a dále obaly z nasávané kartonáže, které zatím nejsou v systémech vermikompostování široce využívány) a v neposlední řadě proces předkompostování, který předchází vlastnímu vermikompostování.

Z předchozích kapitol jasně vyplývá, že jednotlivé postupy zlepšující proces vermikompostování čistírenského kalu působí omezeně a je potřeba je vhodným způsobem kombinovat.

Tato certifikovaná metodika je komplexním návodem k realizaci vermikompostovacího procesu pro materiály obsahující různé typy čistírenského kalu.

IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Tato certifikovaná metodika shrnuje poznatky získané během výzkumu v oblasti vermikompostování materiálu obsahujícího čistírenský kal. Přináší přehled postupů, které umožňují využití vermikompostování pro zpracování kalu, přestože vlastnosti tohoto materiálu za určitých okolností mohou proces silně komplikovat. Díky aplikaci postupů zmíněných v textu metodiky je možno využít živiny a další látky obsažené v kalu ve výživě rostlin. V řadě případů vede vermikompostování kalu k odstranění polutantů, jejichž vysoký obsah znemožňuje aplikaci kalu na zemědělskou půdu.

1. Metodika může sloužit provozovatelům ČOV jako podklad k řešení zpracování kalu vznikajícího při čištění odpadních vod. Předpokládá se využití metodiky zejména v objektech ČOV velikostních kategorií do 2000 EO.
2. Předpokládá se využití metodiky společnostmi zabývajícími se zpracováním odpadů. Na základě postupů doporučených v textu metodiky je možno definovat optimální přístup k řešení vermikompostovacího procesu při zpracování materiálu obsahujícího čistírenský kal v daných konkrétních podmínkách.
3. Metodika může sloužit zemědělcům, kteří chtějí aplikovat čistírenské kaly na zemědělskou půdu a před aplikací je chtějí upravit vermikompostováním.
4. Metodika může být využita pro případnou tvorbu nebo změnu legislativy v oblasti vermikompostování.

V. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Náklady na zpracování čistírenského kalu jsou poměrně vysoké. Předpokládáme-li, že provozovatel ČOV využívá za účelem nakládání s čistírenským kalem služby společnosti zaměřené na nakládání s odpady, činí náklady na odvoz a odstranění kalu z objektu ČOV zpravidla 500 - 800 Kč za tunu kalu. Doprava závisí na nosnosti automobilu, lépe řečeno velikosti kontejneru. Doprava malým kontejnerem s kapacitou cca 5 tun vychází na cca 25 Kč/km, doprava kontejnerem s kapacitou 10 – 20 tun (a více) vychází na cca 40 až 50 Kč/km. Následné zpracování kalů v odpovídajících zařízeních pak znamená další náklady v rozmezí 300 až 500 Kč/t.

Za předpokladu, že se provozovatel ČOV nově rozhodne pro zpracování kalu s využitím procesu vermikompostování dle postupů uvedených v této metodice a bude systém pro vermikompostování provozovat přímo ve svých prostorách, bude možno tyto náklady

eliminovat. Navíc lze předpokládat, že vzniklý vermikompost bude obchodovatelným artiklem, přičemž za 1 t vermikompostu pocházejícího z kalů bude možno inkasovat cca 500 Kč. Předpokládá se prodej vermikompostu získaného vermikompostováním materiálu obsahujícího čistírenský kal pouze zemědělcům za cenu 400 – 600 Kč/t a ne obyvatelům, neboť kompost na bázi kalů se prodává většinou jen zemědělským subjektům.

V modelovém případě obecní ČOV o kapacitě 1 000 EO a roční produkci kalu 23 t v 100% sušině, tj. při obsahu sušiny 20 % 115 tun vlhké hmoty kalu) tak bude za rok možno uspořít pouze oproti variantě spalování kalu. Za vermikompost získaný vermikompostováním kalu ve směsi s vhodnými ko-substráty v optimálním poměru pak bude možno ročně utržit cca 30 000 Kč (ze 115 tun kalů se vyrobí 60 tun vermikompostu x 500 Kč/t).

V případě, že kal nebude zpracováván přímo provozovatelem ČOV, ale jeho obchodním partnerem v podobě společnosti zabývající se nakládáním s pevnými odpady, získá tato společnost příjem za odebrání kalu 500 až 800 Kč/t, který však vykompenzuje náklady na zpracování kalu vermikompostováním. V případě prodeje vermikompostu získá příjem 30 tis. Kč ročně.

Tab. 10: Aktuální náklady na využití nebo odstranění čistírenského kalu

Způsob nakládání s čistírenským kalem		Finanční náklady
přímá aplikace na zemědělskou půdu	nejlevnější způsob, nejsnadnější	300 - 500 Kč/t
kompostování	z krátkodobého hlediska obdobné náklady jako při vermikompostování, výhodou je příjem z prodeje výrobku	500 - 800 Kč/t
vermikompostování	obdobné náklady jako při kompostování. V delším horizontu se náklady na vermikompostování mohou snížit díky využívání žižal na začátku záměru vermikompostování, výhodou je příjem z prodeje výrobku	500 - 800 Kč/t
spalování	nejnákladnější	1 500 - 2 000 Kč/t
skládání	zákonem zakázáno	

VI. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J. 2007. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Science of the Total Environment*. 385, 252–261.
- Anthonisen, A.C., Loehr, R.C., Prakasam, T.B.S., Srinath, E.G. 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. 48, 835-852.
- Butkovskyi, A., Ni, G., Hernandez Leal, L., Rijnaarts, H.H.M., Zeeman, G. 2016. Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 303, 41-47.
- Canellas, L.P., Olivares, F.L., Aguiar, N.L., Jones, D., L., Nebbioso, A., Mazzei, P., Piccolo, A. 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 196, 15–27.
- Částková, T., Hanč, A. 2019. Change of the parameters of layers in a large-scale grape marc vermicomposting system with continuous feeding. *Waste Management & Research*. 37, 826-832.
- Dohányos, M., Zábranská, J., Jeníček, P., Fialka, P., Kajan, M. 1998. Anaerobní čistírenské technologie. NOEL 2000, Brno, 343 stran.
- Domínguez, J., Aira, M., Gómez-Brandón, M. 2010. Vermicomposting: Earthworms Enhance the Work of Microbes. In: Insam, H., Franke-Whittle, I., Goberna, M. (eds.). *Microbes at Work: From Wastes to Resources*. Springer, Berlin, Heidelberg p. 93–114.
- Gómez-Brandón, M., Domínguez, J. 2014. Recycling of solid organic wastes through vermicomposting: microbial community changes throughout the process and use of vermicompost as a soil amendment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44, 1289.
- Hanč, A. 2003. Mobilita kadmia a zinku v čistírenských kalech. *Doktorská disertační práce*, ČZU v Praze, 150 stran.
- Hanč, A., Částková, T., Bazalová, M. 2018. Změny enzymatické aktivity a metody jejího stanovení během procesu vermikompostování v systému průběžného krmení. *Certifikovaná metodika*, ČZU v Praze, 37 s., ISBN: 978-80-213-2865-5.

- Hanc, A., Dreslova, M. 2016. Effect of composting and vermicomposting on properties of particle size fractions. *Bioresource Technology*. 217, 186-189.
- Hanc, A., Enev, V., Hrebeckova, T., Klucakova, M., Pekar, M. 2019. Characterization of humic acids in a continuous-feeding vermicomposting system with horse manure. *Waste Management*. 99, 1-11.
- Hanč, A., Hřebečková, T. 2019. Vermikomposty – jejich příprava a složení. In: Sborník „Racionální použití hnojiv“, ČZU v Praze, Praha: 41-48. ISBN: 978-80-213-2983-6.
- Hanc, A., Chadimova, Z. 2014. Nutrient recovery from apple pomace waste by vermicomposting technology. *Bioresource Technology*. 168, 240–244.
- Hanc, A., Pliva, P. 2013. Vermicomposting technology as a tool for nutrient recovery from kitchen bio-waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 15, 431–439.
- Hanč, A., Plíva, P. 2013. Vermikompostování bioodpadů. Certifikovaná metodika, ČZU v Praze, 35 s. ISBN: 978-80-213-2422-0.
- He, X., Zhang, Y., Shen, M., Zeng, G., Zhou, M., Li, M. 2016. Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. *Bioresource Technology*. 218, 867-873.
- Innemanová, P., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2022. Pilot-scale vermicomposting of dewatered sewage sludge from medium-sized WWTP. *Detritus*. 18:35.
- Hill, G.B., Baldwin, S.A., Vinnerås, B. 2013. Evaluation of Solvita compost stability and maturity tests for assessment of quality of end-products from mixed latrine style compost toilets. *Waste Management*. 33, 1602–1606.
- Ip, Y.K., Chew, S.F., Randall, D.J. 2001. Ammonia toxicity, tolerance, and excretion. *Fish Physiology*. 20, 109-148.
- Kováčik, P., Ryant, P. 2019. *Agrochémia – princípy a prax*, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 358 s., ISBN: 978-80-552-2051-2.
- Pilnáček, V., Innemanová, P., Šereš, M., Michalíková, K., Stránská, Š., Wimmerová, L., Cajthaml, T. 2019. Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying as a pretreatment method prior to the application of sewage sludge in agriculture. *Ecological Engineering*. 127, 212-219.

- Plíva, P., Altmann, V., Hanč, A., Hejátková, K., Roy, A., Souček, J., Valentová, L. 2016. Kompostování a kompostárny. Profi Press s. r. o., Praha. 149 s. ISBN: 978-80-86726-74-8.
- Racz L., Goel R.K. 2010. Fate and removal of estrogens in municipal wastewater. *Journal of Environmental Monitoring*. 12, 58-70.
- Rorata, A., Wloka, D., Grobelak, A., Grosser, A., Sosnecka, A., Milczarek, M., Jelonek, P., Vandenbulcke, F., Kacprzak, M. 2017. Vermiremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in sewage sludge composting proces. *Journal of Environmental Management*. 187, 347-353.
- Sidhu, H., O'Connor, G., Ogram, A., Kuldip Kumar, K. 2019. Bioavailability of biosolids-borne ciprofloxacin and azithromycin to terrestrial organisms: Microbial toxicity and earthworm responses. *Science of the Total Environment*. 650, 18-26.
- Sinha, R.K., Nair, J., Bharambe, G., Patil, S., Bapat, P. 2008. Vermiculture revolution: a low-cost and sustainable technology for management of municipal and industrial organic wastes (solid and liquid) by earthworms with significantly low greenhouse gas emissions. In: Daven, J. I., Klein, R. N. (eds.). *Progress in waste management research*. Nova Science Publishers. New York. p. 159 - 227. ISBN: 978-1-60456-235-4.

VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Chane, A., Nigussie, A. 2021. Carbon dioxide and methane emissions during the composting and vermicomposting of sewage sludge under the effect of different proportions of straw pellets. *Atmosphere*. 12, 1380: 1-13.
- Friedrichová, N. 2021. Fyzikálně-chemické a mikrobiologické vlastnosti čistírenských kalů. Diplomová práce. ČZU v Praze, Praha, 80 stran.
- Gari, B., Hanč, A., Švehla, P. 2021. The effect of vermicomposting on the availability of phosphorus in sewage sludge mixed with straw pellets. In: *Sborník „Racionální použití hnojiv“*, ČZU v Praze, Praha, s. 129-132. ISBN: 978-80-213-3147-1.
- Gari, B., Hanč, A., Švehla, P., Chane, A. 2020. Emissions of methane and carbon dioxide during composting and vermicomposting of sewage sludge. In: *Sborník „Racionální použití hnojiv“*, ČZU v Praze, Praha, s. 113-116. ISBN: 978-80-213-3054-2.

- 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 (1), 9–14.
- 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.
- Hanc, A., Hrebeckova, T., Plíva, P., Cajthaml, T. 2020. Vermicomposting of sludge from a malt house. *Waste Management*. 118, 232-240.
- Hanč, A., Plíva, P. 2012. Vermicomposting of garden biowaste and sewage sludge. *Waste forum*. 3, 103-110.
- Hanč, A., Švehla, P., Hnátková, T., Innemanová, P., Cajthaml T. 2019. Pomohou žížaly odstranit mikropolutanty z čistírenských kalů? *Odpadové fórum*. 20 (7-8), 24-26.
- Hanč, A., Vašák, F., Švehla, P. 2011. Vliv obsahu amonného dusíku na vermikompostování čistírenského kalu. In: *Sborník „Racionální použití hnojiv“ ČZU v Praze, Praha*, s. 88-91. ISBN: 978-80-213-2224-0.
- Humplík, M., Hrčka, M., Hanč, A. 2021. Kutnohorská kompostárna testuje kompostování a vermikompostování nasávané kartonáže. *Odpady*. 8, 14-15.
- Innemanová, P., Grasserová, A., Cajthaml, T. 2022. Pilot-scale vermicomposting of dewatered sewage sludge from medium-sized WWTP. *Detritus*. 18:35.
- Kozlíková, N. 2021. Vermikompostování čistírenského kalu s přidavkem slaměných pelet. *Diplomová práce. ČZU v Praze, Praha*, 141 stran.
- Matoušková, Z. 2020. Problematika farmak a produktů osobní péče v čistírenských kalech. *Diplomová práce. ČZU v Praze, Praha*, 102 stran.
- Míchal, P., Hanč, A., Švehla, P. 2019. Inhibiční vliv amoniakálního dusíku při vermikompostování čistírenského kalu a možnosti jeho potlačení. *Waste Forum*. 2, 144-152.
- Míchal, P., Hanč, A., Švehla, P. 2019. Vermikompostování čistírenského kalu za účelem eliminace mikropolutantů. In: *„Sborník přednášek v elektronické formě Týden výzkumu a inovací pro praxi 2019“*. CEMC, Praha: 5 stran. ISBN: 978-80-85990-34-8.

- 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. In: Sborník z 29. konference Kaly a odpady 2020, Senec, Asociácia čistírenských expertov Slovenskej republiky, Senec, 2020: 174-178. ISBN: 978-80-973196-1-8.
- Míchal, P., Švehla, P., Hanč, A., Innemanová, P., Hnátková, T., Cajthaml, T. 2019. Zpracování čistírenského kalu s využitím žížal. In.: Sborník z 13 bienální konference VODA 2019, Poděbrady, CzWA service, s.r.o., Brno, 519-522. ISSN: 2694-7013.
- Novák, P. 2022. Osud vybraných mikropolutantů během kompostování. Diplomová práce. ČZUv Praze, Praha, 85 stran.
- Pauliová, M., Hanč, A., Balík, J. 2011. Využití žížal ke zpracování čistírenského kalu a zahradního bioodpadu. In: „Sborník přednášek, Odpadové fórum 2011“. CEMC, Praha: č. 043, 6 s. ISBN: 978-80-85990-18-8.
- Picková, B. 2021. Změny fyzikálních a chemických parametrů během kompostování čistírenských kalů. Diplomová práce. ČZUv Praze, Praha, 65 stran.
- Pospíšil, V. 2022. Vliv žížal na chování mikropolutantů v čistírenských kalech. Diplomová práce. ČZUv Praze, Praha, 129 stran.
- Říhová, B. 2021. Vermikompostování předkompostovaného čistírenského kalu. Diplomová práce. ČZUv Praze, Praha, 71 stran.
- Semerád, J., Hatašová, N., Grassarová, 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.
- Tojfllová, B. 2020. Faktory inhibující aktivitu žížal v čistírenském kalu. Diplomová práce. ČZU, Praha, 70 stran.

VIII. JMÉNA OPONENTŮ A NÁZVY JEJICH ORGANIZACÍ

Posudek odborníka v daném oboru vypracoval:

Ing. Petr Plíva, CSc.; Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i., Drnovská 507, 161 01 Praha 6.

Posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy vypracovala:

Ing. Michaela Budňáková; Ministerstvo zemědělství ČR (odbor rostlinných komodit), Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1.

IX. DEDIKACE

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu NAZV QK1910095 „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“.

Osvědčení odborného orgánu státní správy

Osvědčení o uznání certifikované metodiky vydalo Ministerstvo zemědělství ČR dne: 3.11.2022 (osvědčení č.: MZE-61482/2022-13123).

Název: Optimální přístupy k vermikompostování čistírenského kalu

Certifikovaná metodika

Autoři: **doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.**
Ing. Pavel Švehla, Ph.D.
Ing. Pavel Míchal, Ph.D.
RNDr. Petra Innemanová, Ph.D.
Ing. Milan Hřčka

Vydavatel: Česká zemědělská univerzita v Praze

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

Tiskárna: Powerprint s.r.o.
Brandejsovo nám. 1219/1, Praha – Suchbát, 165 00

Pořadí vydání: **1. vydání**

Rok vydání: 2022

ISBN: **978-80-213-3224-9**

Náklad: **40 výtisků**

Počet stran: 39

Vydání: **první**

Doporučená cena: **neprodejné**