

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vermikompostování čistírenského kalu a odpadního
papíru**

Diplomová práce

Bc. Václav Lancinger

Technologie a zpracování odpadů

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.

Konzultant: Ing. Milan Hrčka

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vermikompostování čistírenského kalu a odpadního papíru" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu panu doc. Ing. Aleši Hančovi, Ph.D., Ing. Milanovi Hřčkovi a Ing. Tereze Hřebečkové za jejich čas, pomoc, trpělivost, odborné rady a konzultace pro zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci projektu NAZV č. QK1910095 s názvem „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu“.

Vermikompostování čistírenského kalu a odpadního papíru

Souhrn

Cílem diplomové práce bylo zhodnocení vermikompostování čistírenského kalu a odpadního papíru. Poloprovozní pokus byl proveden v Recyklačním centru v Kutné Hoře, ve společnosti ZERS a trval přibližně šest měsíců. Pokus byl založen na předkompostování dvou čistírenských kalů a materiálu nasávané kartonáže. Kal č. 1 pocházel z čistírny odpadních vod, která měla velikostní zatížení nad 100 tisíc ekvivalentních obyvatel a druhý čistírenský kal byl dovezen z ČOV, která měla kapacitu mezi 10 tisíc až 100 tisíc ekvivalentních obyvatel. Byly vytvořeny dvě směsi a každá obsahovala jeden kal a nasávanou kartonáž. Dále se založily dvě vermikompostovací zakládky a dvě kontrolní zakládky bez žížal. Vermikompostování probíhalo na způsob průběžného krmení. Pro vermikompostovací zakládky byly použity žížaly rodu *Eisenia andrei*.

Statistické vyhodnocení potvrdilo významné rozdíly ve stáří vrstev zkoumaných zakládek. Nejvyšší rozdíly ve fyzikálně-chemických parametrech byly nalezeny nejčastěji mezi nejmladší (VI) a nejstarší (I) vrstvou. Dále byl zaznamenán významný počet žížal a biomasy v nejmladší vrstvě. V nejmladší vrstvě vermikompostovací zakládky č. 1 byl vyšší počet žížal o 541 % a ve druhé o 406 % v porovnání s nejstarší vrstvou. Biomasa byla vyšší o 1786 % mezi nejmladší a nejstarší vrstvou v první vermikompostovací zakládce. Druhá zakládka měla zvýšení biomasy o 978 % mezi nemladší a nejstarší vrstvou. Dále byly nalezeny rozdíly u dvou sledovaných čistírenských kalů v různých parametrech. Hodnoty se porovnávaly mezi namíchanou směsí před vermikompostováním a nejstarší vrstvou zakládky. Vermikompostovací zakládka s první směsí měla výsledné pH 7,49 ve druhé směsi bylo naměřeno pH s hodnotou 7,52. Elektrická vodivost se snížila o 48 % v první směsi. Druhá směs měla pokles pouze o 6 %. Vlhkost první zakládky klesla o 11 % a ve druhé o 7 %. Naopak sušina se zvýšila o 27 % a ve druhé vermikompostovací zakládce byla vyšší o 18 %. Poměr C:N se výrazně snížil u obou vermikompostovacích zakládek. V první došlo ke snížení o 77 % a ve druhé o 39 %. Celkový obsah fosforu se zvýšil o 25 % ve vermikompostovací zakládce č. 1 a v zakládce č. 2 pak o 19 %. Přístupný obsah fosforu se snížil ve všech zakládkách. Celkového draslíku bylo více o 24 % než na začátku vermikompostování směsi č. 1 a v zakládce č. 2 bylo na konci o 38 % draslíku více. Nejvyšší hodnota přístupného draslíku byla zaznamenána ve druhé zakládce, a to 1983,62 mg/kg, první měla 1147,85 mg/kg. Vermikompostovací zakládka č. 1 měla vyšší množství celkového hořčíku o 20 % a zakládka č. 2 dokonce o 30 %. Přístupné množství hořčíku se také zvýšilo u obou zakládek. Hodnoty celkového vápníku byly u zakládky č. 1 85316 mg/kg a č. 2 71051 mg/kg.

Pro budoucí výzkumy bylo doporučeno provádět pokusy v laboratorních podmínkách vždy s novou směsí, aby nedocházelo k biologickému rozkladu před přidáním všech vrstev. Dále se doporučuje zvýšit počet opakování pro přesnější výsledky.

Klíčová slova: čistírenský kal, nasávaná kartonáž, průběžné krmení, vermikompostování

Vermicomposting of sewage sludge and waste paper

Summary

The aim of the thesis was to evaluate the vermicomposting of sewage sludge and waste paper. The semi-operational trial was carried out at the Recycling Center in Kutná Hora, at the ZERS company, and lasted approximately six months. The experiment was based on the pre-composting of two sewage sludges and the material of sucked cardboard. Sludge No. 1 came from a sewage treatment plant, which had a size load of more than 100 thousand equivalent inhabitants, and the second sewage sludge was imported from a sewage treatment plant, which had a capacity of between 10 thousand and 100 thousand equivalent inhabitants. Two mixes were created and each contained one sludge and aspirated carton. In addition, two vermicomposting sites and two control sites without earthworms were established. Vermicomposting was carried out using continuous feeding. Earthworms of the genus *Eisenia andrei* were used for vermicomposting.

The statistical evaluation confirmed significant differences in the age of the layers of the investigated foundations. The highest differences in physico-chemical parameters were found most often between the youngest (VI) and oldest (I) layers. Furthermore, a significant number of earthworms and biomass was recorded in the youngest layer. In the youngest layer of vermicomposting site No. 1, the number of earthworms was higher by 541 % and in the second layer by 406 % compared to the oldest layer. Biomass was higher by 1786 % between the youngest and oldest layers in the first vermicomposting pad. The second deposit had a biomass increase of 978 % between the youngest and oldest layers. Furthermore, differences were found in the two monitored sewage sludges in various parameters. Values were compared between the mixed mixture before vermicomposting and the oldest layer of the stock. The vermicomposting loading with the first mixture had a resulting pH of 7.49, in the second mixture a pH of 7.52 was measured. The electrical conductivity decreased by 48 % in the first mixture. The second mixture had a decrease of only 6 %. The humidity of the first loading decreased by 11 % and in the second by 7 %. On the contrary, dry matter increased by 27 % and in the second vermicomposting plant it was higher by 18 %. The C:N ratio decreased significantly in both vermicomposting bases. In the former there was a reduction of 77 % and in the latter of 39 %. The total phosphorus content increased by 25 % in vermicomposting plant No. 1 and by 19 % in plant No. 2. Available phosphorus content decreased in all landfills. Total potassium was 24 % more than at the beginning of vermicomposting of mixture No. 1, and in compost No. 2 there was 38 % more potassium at the end. The highest value of accessible potassium was recorded in the second base, namely 1983.62 mg/kg, the first had 1147.85 mg/kg. Vermicomposting site No. 1 had a higher amount of total magnesium by 20 % and site No. 2 even by 30 %. The available amount of magnesium also increased for both bases. The values of total calcium were 85,316 mg/kg and 71,051 mg/kg at site No. 1 and No. 2, respectively.

For future research, it was recommended to conduct experiments in laboratory conditions always with a new mixture to avoid biodegradation before adding all the layers. It is also recommended to increase the number of repetitions for more accurate results.

Keywords: sewage sludge, molded pulp, continuous feeding, vermicomposting

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Cíl práce	10
3 Literární rešerše	11
3.1 Čistírenské kaly	11
3.1.1 Charakteristika čistírenských kalů	11
3.1.2 Druhy čistírenského kalu	11
3.1.3 Nakládání s čistírenskými kaly	12
3.2 Odpadní papír	14
3.2.1 Produkty z papíru.....	14
3.2.2 Charakteristika odpadního papíru.....	14
3.2.3 Nasávaná kartonáž.....	14
3.2.4 Produkce a nakládání s odpadním papírem	15
3.3 Kompostování.....	15
3.3.1 Podmínky pro kompostování	16
3.3.2 Způsoby kompostování.....	16
3.4 Vermikompostování.....	17
3.4.1 Fáze vermikompostování	17
3.4.2 Faktory ovlivňující vermikompostování.....	18
3.4.2.1 Abiotické faktory	18
3.4.2.1.1 Obsah vlhkosti	18
3.4.2.1.2 pH	18
3.4.2.1.3 Teplota	18
3.4.2.1.4 Provdzušňování.....	18
3.4.2.1.5 Kvalita materiálu	19
3.4.2.1.6 Světlo	19
3.4.2.1.7 Poměr C:N	19
3.4.2.2 Biotické faktory	19
3.4.2.2.1 Hustota populace žížal ve vermikompostovací zakládce.....	19
3.4.2.2.2 Mikroorganismy	20
3.4.2.2.3 Enzymy	20
3.4.3 Rozdíl mezi kompostováním a vermikompostováním	20
3.4.4 Historie vermikompostování	21
3.4.5 Předkompostování	21
3.4.6 Kombinace kompostování a vermikompostování	22
3.4.7 Způsoby vermikompostování	22

3.4.7.1	Malé vermikompostéry	22
3.4.7.2	Jednoduché technologie vermikompostování	23
3.4.7.2.1	Vermikompostování v pásových zakládkách na volné ploše	23
3.4.7.2.2	Vermikompostování v ohraničených záhonech	23
3.4.7.3	Složitější technologie vermikompostování	23
3.4.7.3.1	Vermikompostování ve dvoumodulovém vermireaktoru	24
3.4.7.3.2	Vermikompostování ve vermireaktorech se souvislým procesem	24
3.4.8	Výsledné produkty vermikompostování	24
3.4.8.1	Vermikompost	25
3.4.8.2	Výluhy	25
3.4.8.3	Žížaly	26
3.4.9	Hubení škůdců a chorob pomocí vermikompostu	26
3.5	Žížaly vhodné pro vermikompostování	27
3.5.1	Rozdělení žížal do ekologických skupin	27
3.5.1.1	Eisenia andrei	28
3.5.1.2	Eisenia fetida	29
3.5.1.3	Dendrobaena veneta	30
3.5.1.4	Dendrodrilus rubidus	30
3.5.1.5	Lumbricus rubellus	31
3.5.1.6	Perionyx excavatus	31
3.5.1.7	Eudrilus eugeniae	31
3.6	Vermikompostování čistírenských kalů	31
3.7	Vermikompostování odpadního papíru	32
4	Metodika	34
4.1.1	Materiál	34
4.1.2	Průběh pokusu	34
4.1.3	Odběry vzorků a počítání žížal	36
4.2	Agrochemické analýzy	37
4.2.1	Stanovení pH	37
4.2.2	Měrná vodivost	37
4.2.3	Stanovení uhlíku a dusíku	37
4.2.4	Stanovení celkového obsahu makroprvků	37
4.2.5	Stanovení obsahu přístupných makroprvků	37
4.3	Statistické analýzy	38
5	Výsledky	39
5.1	Vstupní suroviny	39
5.2	Namíchané směsi	41

5.3	Kontrolní zakládka se směsí č. 1.....	42
5.4	Kontrolní zakládka se směsí č. 2.....	45
5.5	Vermikompostovací zakládka se směsí č. 1	49
5.6	Vermikompostovací zakládka se směsí č. 2	53
6	Diskuze	58
7	Závěr.....	63
8	Literatura.....	65
9	Samostatné přílohy.....	I

1 Úvod

Během několika posledních desetiletí vedla četná lidská činnost ke zvýšení produkce odpadních materiálů. Podle literatury se ročně ve světě vyprodukuje asi 2,01 miliardy tun tuhého komunálního odpadu. Z celkové produkce tuhého komunálního odpadu činí 46 % biologicky rozložitelný odpad. Odhaduje se, že produkce se zvýší do roku 2050 na 3,40 miliardy metrických tun (Vuković et al. 2021).

Nakládání s biologicky rozložitelným odpadem je hlavním globálním problémem. Techniky jeho likvidace jako je spalování, pyrolýza a zplyňování mají vysoké investiční náklady (Alshehrei & Ameen 2021). Z dostupných údajů je zřejmé, že současné metody nakládání s organickým odpadem nejsou schopny zvládnout enormní objemy odpadu (Awasthi et al. 2022).

Čistírenské kaly mohou být velmi nebezpečné odpady. Obsahují těžké kovy, velké množství dusíku a patogenní látky. Nakládání s kaly z čistíren odpadních vod je jednou z největších výzev. Ukládání čistírenských kalů na zemědělskou půdu snížilo kvalitu půd a způsobilo velké riziko pro lidské zdraví i životní prostředí. Proto se hledá bezpečný, ekonomický a enviromentální způsob likvidace čistírenských kalů (Amouei et al. 2017).

Rovněž se celosvětově zvýšila produkce odpadního papíru, a proto se hledá i optimální způsob zpracování odpadů z papíru. Kvůli svým vlastnostem ale může být odpadní papír vhodný materiál pro biologické zpracování. Papír je velmi dobře biologicky rozložitelný, není toxický a má velký obsah uhlíku (Gupta & Garg 2009).

Biologicky snadnou metodou pro přeměnu organických odpadů může být vermikompostování. Vermikompostování je biooxidační proces, při kterém žížaly interagují s některými mikroorganismy a urychlují stabilizaci organické hmoty. Je to velmi účinný, levný, ekologický a snadný způsob recyklace biologicky rozložitelného odpadu pomocí vybraných druhů žížal (Yilmaz & Agdag 2020).

Z enviromentálního a ekonomického hlediska se technologie vermikompostování může ukázat jako účinná a udržitelná metoda využívání čistírenských kalů a odpadního papíru.

Práce je zaměřena na vermikompostování čistírenského kalu a odpadního papíru. Praktická část diplomové práce je zaměřena na zjištění úspěšnosti pokusu zpracování dvou čistírenských kalů s nasávanou kartonáží.

2 Cíl práce

Cílem práce je posoudit agrochemické a biologické vlastnosti vermikompostovaného čistírenského kalu obohaceného odpadním papírem, konkrétně nasávanou kartonáží.

Hypotézy:

1. Budou nalezeny statisticky významné rozdíly základních fyzikálně-chemických vlastností ve vrstvách různého stáří.
2. Vyšší počty žížal a větší množství biomasy budou nalezeny v mladších vrstvách.
3. Nebudou nalezeny významnější rozdíly v parametrech mezi 2 použitými kaly.

3 Literární rešerše

3.1 Čistírenské kaly

3.1.1 Charakteristika čistírenských kalů

Čistírenský kal vzniká jako heterogenní suspenze při procesech čištění odpadních vod v čistírnách odpadních vod (ČOV). Obvykle se vyskytuje ve formě kapaliny nebo polotuhé kapaliny, která typicky obsahuje v závislosti na použitých procesech od 0,25 do 20 % pevných látek (Collivignarelli et al. 2019). Produkce čistírenských kalů v jednotlivých evropských zemích se pohybuje od 100 do 350 tis. tun v sušině (Godlewska et al. 2022).

Kaly z odpadních vod produkované ČOV jsou dobrým zdrojem makroprvků a mikroprvků, které obecně obsahují velké množství organické hmoty (Liu et al. 2012). Pokud jde o těžké kovy, jejich obsah v kálech je velmi proměnlivý (Collivignarelli et al. 2019). Čistírenský kal nejčastěji obsahuje rizikové prvky jako je kadmium (Cd), olovo (Pb), měď (Cu), zinek (Zn), chrom (Cr) atd. (Liu et al. 2012). Obsah rizikových prvků je však klíčovým faktorem pro jeho opětovné použití a recyklaci, protože tyto rizikové prvky mohou představovat hrozbu pro lidské zdraví. Například arsen je karcinogenní, kadmium je pravděpodobně karcinogenní, teratogenní a embryotoxické, rtuť je teratogenní (Collivignarelli et al. 2019). Tyto rizikové prvky se mohou dostat do lidského a zvířecího organismu konzumací plodin pěstovaných tam, kde byl kal aplikován do půdy (Dusa et al. 2020).

Dále obsahují kaly organickou hmotu, dusík, fosfor, draslík, a v menší míře vápník, síru, hořčík (Collivignarelli et al. 2019).

Kaly z čistíren byly Evropským parlamentem a radou určeny k povinné recyklaci a definovány jako opakovaně použitelný odpad (Sukru 2021). Kaly pomáhají udržovat půdní strukturu, schopnost zadržovat vodu v půdě, kapacitu výměny kationtů půdy a biologickou aktivitu půdy (Liu et al. 2012).

Podle velikosti ČOV lze kal produkovaný na lince odpadních vod podrobit dočištění. Cílem těchto úprav je snížit obsah vody (např. zahušťováním) nebo stabilizovat organickou hmotu (anaerobní digesce, aerobní stabilizace), za účelem získání pevného zbytku s obsahem celkových pevných látek v rozmezí od 12 do 30 % hmotnosti. Čistírenský kal lze také zpracovávat v příslušných čistírnách kalů, aby byla zajištěna chemická nebo biologická stabilizace a odstranění patogenů (Collivignarelli et al. 2019).

3.1.2 Druhy čistírenského kalu

Podle konfigurace ČOV lze nalézt různé druhy kalu jako primární, sekundární, terciální a smíšený kal (Collivignarelli et al. 2019).

Primární kal je zbytek pocházející z primární usazovací nádrže. Skládá se převážně ze snadno sedimentujících pevných látek a nerozpuštěného materiálu, obsaženého v surové odpadní vodě. Primární kal se obecně vyznačuje vysokým množstvím organické hmoty a obsahem celkových pevných látek v rozmezí 2 až 7 % hmotnosti (Collivignarelli et al. 2019).

Sekundární kal je zbytek produkovaný během biologického čištění odpadní vody, který odstraňuje organické znečištění z odpadních vod. Jedná se o komplexní heterogenní směs mikroorganismů, biologických složek (nukleové kyseliny, proteiny, sacharidy a lipidy). Dále obsahují nerozpuštěné organické látky (např. papír, rostlinné zbytky, oleje, fekální materiál atd.), anorganické materiály, které nebyly odstraněny v primárním čištění, a vodu. Obecně se

obsah celkových pevných látek pohybuje od 0,5 do 1,5 % hmotnosti (Collivignarelli et al. 2019).

Terciální kal vzniká při terciálním čištění neboli třetím stupni čištění odpadní vody v ČOV. Jedná se o dočištění odpadní vody. Odstraňuje se zde fosfor z vody, nerozpuštěné látky a patogenní organismy (Collivignarelli et al. 2019).

Smišený kal se získá smícháním různých druhů kalů (např. primární, sekundární a terciální) (Collivignarelli et al. 2019).

3.1.3 Nakládání s čistírenskými kaly

Zpracování a odstraňování kalů vzniklých při čištění odpadních vod, je jedním z nejdůležitějších ekologických problémů současnosti. Produkované kaly mají velký objem a mohou být nebezpečné. Studie související s bezpečným zacházením, recyklací a odstraňováním jsou velmi důležité (Khwairakpam & Bhargava 2009). Nakládání s kaly produkovanými z čistíren odpadních vod je jednou z nejdražších výzev, kterým se průmysl odpadních vod zabývá. Inženýři a regulační orgány se snaží vyřešit tento problém. Produkce obrovského množství kalu vedla k vývoji různých způsobů jejich využití a odstraňování, včetně ukládání na skládky odpadů, odstraňování ve spalovnách a ukládání do půdy (Hossain et al. 2017).

Kal je potenciálním zdrojem živin, který lze použít jako hnojivo. Vysoký obsah organické hmoty v kalech může zlepšit fyzikální vlastnosti půdy. Zlepšené vlastnosti zahrnují strukturu půdy, zvyšují pórovitost a zadržování vody v půdě (Hossain et al. 2017).

Ukládání čistírenských kalů na zemědělskou půdu má i své nevýhody. Velké množství dusíku a fosforu v kalech může narušovat vývoj rostlin, zvyšovat toxicitu půdy a může mít depresivní účinky na metabolismus půdních mikroorganismů (Khwairakpam & Bhargava 2009). Takové odpady kazí estetiku místních stanovišť, ale současně vytvářejí problémy se znečištěním životního prostředí, pokud není přijata správná metoda jejich odstraňování (Suthar 2010).

Pozemní aplikace kalu byla omezena kvůli přítomnosti toxických kontaminantů. Toxické kontaminanty jsou těžké kovy a mikrobiální patogeny, které představují rizika pro životní prostředí a lidské zdraví. Těžké kovy jsou velkým problémem kvůli jejich biologicky nerozložitelné a akumulární povaze, která může vést k poklesu úrodnosti půdy. Rajčata nebo salát pěstované v půdách s vysokými koncentracemi kovů, mohou akumulovat rizikové prvky do lidského organismu, pokud jsou plodiny pozřeny syrové. Patogenní organismy přetrvávají v půdách a rostlinách měsíce až roky, proto se mohou akumulovat v rostlinách a způsobit různé choroby (Sarker & Kashem 2020).

Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů omezuje ukládání čistírenských kalů na skládky a podporuje využívání odpadních vod v zemědělství. Mnoho zemí v Evropské unii má tendenci odmítat tato řešení z důvodu poklesu kapacity skládek a přísné legislativy Evropské unie. Zpracování kalu je vážným problémem nejen v evropských zemích, ale také v Austrálii, Latinské Americe, asijských zemích a Turecku (Sukru 2021).

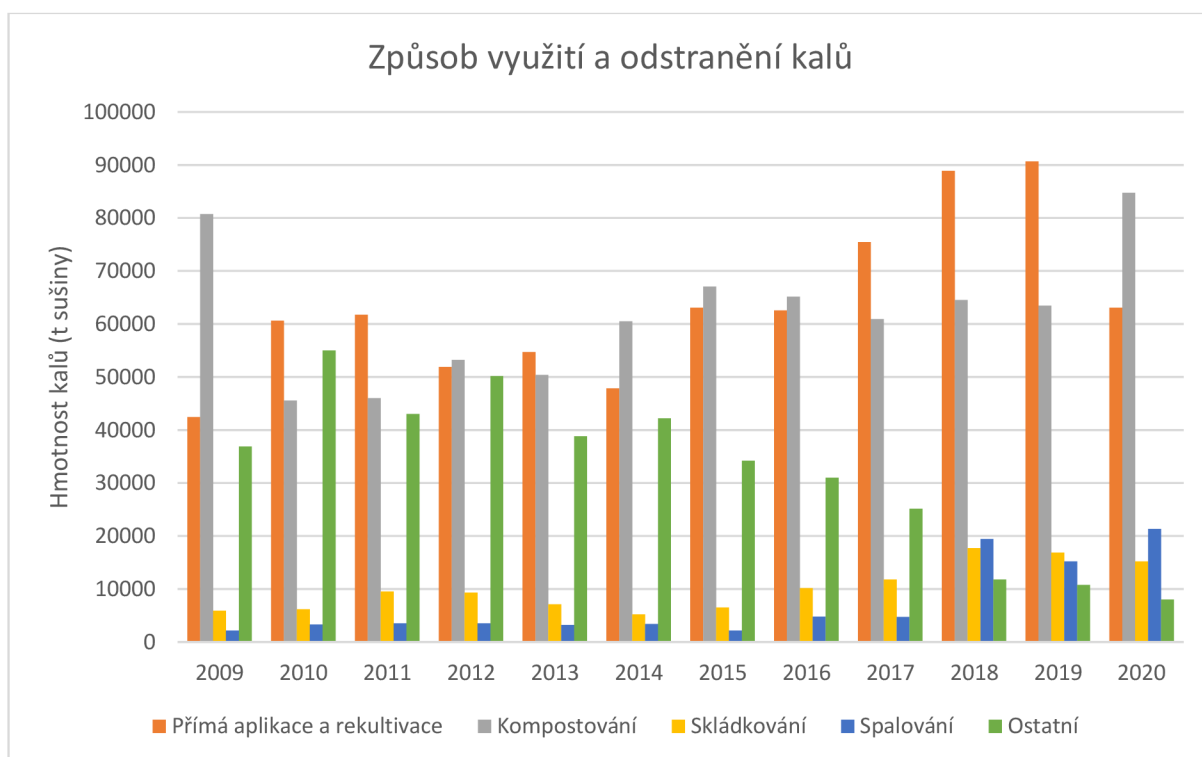
Podle údajů Eurostatu více než 50 % Evropské unie stále používá kal v zemědělské činnosti. Téměř sedmnáct zemí využívá způsob kompostování. Estonsko, Maďarsko a Finsko mají podíl kompostování čistírenských kalů vyšší než 60 %. Zatímco Nizozemsko, Německo, Slovinsko a Rakousko používají jako hlavní způsob spalování čistírenských kalů. Ukládání na kontrolované skládky bylo používáno jako hlavní způsob odstranění na Maltě, v Chorvatsku, Rumunsku, Itálii, Srbsku, Bosně a Hercegovině. Turecko nakládá se svými čistírenskými kaly různými metodami. Zatímco 26 % z celkového množství kalu je nakonec uloženo na skládku,

6 % kalu se používá pro zemědělské účely a zbývající množství se využívá jako palivo v cementárnách (Sukru 2021).

- Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech
- Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, rostlinných biostimulantech a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd
- Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady
- Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů
- Vyhláška č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva
- Vyhláška č. 377/2013 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv

V roce 2021 byla nově přepracována legislativa odpadů a hnojiv, tím se snížil počet vyhlášek, které se zabývaly danou problematikou. Tématem čistírenských kalů se dále zabývají odvětvové technické normy (Mohrmann 2022). V grafu můžeme vidět způsob využití a odstranění kalů od roku 2009 do 2020.

Graf č.1: Produkce kalů, způsob jejich využití a odstranění (ČSÚ)



Ostatní způsob využití kalů znamená ukládání čistírenských kalů na skládky odpadů, formou technického zabezpečení skládky. Největší produkce kalů byla v roce 2018 a od té doby se produkce postupně snižuje. Z tabulky je vidět velká variace mezi různými druhy odstraňování odpadů. V roce 2020 převládá využití kalů pomocí kompostování a dále se snížilo technické uložení na skládky.

Při zvažování ekonomického a udržitelného přístupu je technologie kompostování a vermikompostování nejpraktičtější možností (Sarker & Kashem 2020). S ohledem na výše uvedená fakta se jeví vermikompostování jako dobrý způsob využití čistírenských kalů, které má mnoho výhod (Sukru 2021).

3.2 Odpadní papír

3.2.1 Produkty z papíru

Základní rozdělení produktů z papíru spadá do tří skupin podle plošné hmotnosti. Jedná se o materiály: papír, lepenka a kartón. Papírové produkty se dále dělí na tiskové papíry, psací papíry, potahové papíry, hygienické papíry, balící papírové materiály, technické a průmyslové papíry atd. Mezi kartony se řadí tiskové kartony, psací, technické a průmyslové. Dále ostatní a speciální kartony. Skupinu lepenek zahrnují ruční lepenky, strojní, slepované a vlnité lepenkové materiály (Kocman 2011).

3.2.2 Charakteristika odpadního papíru

Papír je jedním z nejsnáze recyklovatelným materiálem. Může se zpracovat při zpětném využití jako papírenská vláknina nebo tepelným využitím. Další způsoby jsou kompostování nebo skládkování, kde podléhá biodegradaci (Lešikar et al. 2012).

Papír a lepenka jsou materiály složené především z celulózových vláken, zbytkového ligninu a inertních aditiv, jako jsou jíly, kaolin, uhličitán vápenatý a škrob. Vstupní suroviny jsou především dřevo a papír určený pro recyklaci. Odpadový papír je papír a lepenka, který držitel odkládá, má úmysl ho odložit nebo je požadováno ho odložit a který bude separovaně odebrán primárně pro zpracování recyklací (materiálového využití). Dle české technické normy ČSN EN 643 se pojednává o odpadovém papíru jako o papíru pro recyklaci, jehož jednotlivé druhy jsou touto normou definovány pro potřeby recyklace v průmyslu papíru a lepenky. Papír pro recyklaci je využíván jako materiál pro výrobu papíru a lepenky od prvotního stádia jeho výroby (Lešikar et al. 2012).

3.2.3 Nasávaná kartonáž

Nasávaná kartonáž se skládá z odpadového papíru a vody, takže je 100% biologicky rozložitelná. Papírová vlákna i voda jsou recyklovány a znovu využity ve výrobním procesu, což vede k téměř nulové produkci odpadu. Dále se využívají v procesu papírové výroby jako lepenka, knihy, noviny, časopisy a další. Tento způsob zvyšuje návratnost spotřebovaného papíru. Přírodní celulózová nebo lignocelulózová vlákna jsou hlavními surovinami pro výroby z nasávané kartonáže. Přírodní vlákna používaná pro výrobu nasávané kartonáže mohou pocházet z různých zdrojů. Používají se recyklovaná vlákna, odpady zemědělské biomasy. Odpady z biomasy jsou řepkové slámy, rýžové slámy, konopná vlákna a bambusová vlákna. Většina proložek od vajec se v současnosti vyrábí ze 100% vytríděného novinového papíru (Zhang et al. 2022).

Proces výroby nasávané kartonáže zahrnuje několik kroků: mísení, formování, sušení, lisování, tisk a další (Zhang et al. 2022). Proces výroby nasávané kartonáže je ve srovnání s postupem výroby papíru poměrně jednoduchý. Sběrové papíry jsou rozvláknovány vodou a rozmělněná suspenze je skladována ve skladovacích nádržích. Ze skladovacích nádrží se posílá do formovače. Formované výrobky se dále vysouší ve vysokoteplotní sušárně nebo přímým lisováním za tepla (Cho et al. 2009).

Kvalita a cena výrobků z nasávané kartonáže je ovlivněna různými faktory. Jedná se o zdroje vláken, formovací procesy a další potřebné úpravy. Nejvýhodnější způsob je zpracování prvotních vláken a recyklovaných vláken zároveň během výroby (Zhang et al. 2022). Při výrobě nasávané kartonáže se nepoužívají žádné toxické látky (Obal centrum 2022).

Výhody výrobků z nasávané kartonáže jsou velká pevnost, pružnost a tvarová variabilita při malé hmotnosti (Novopol 2022). Nasávaná kartonáž je pozoruhodně univerzální a tvarovatelná, takže může poskytnout nekonečné možnosti designu (Martínez et al. 2016). Uplatnění má díky svým vlastnostem proti mechanickému poškození. Používá se jako ideální obalový materiál, protože dokáže tlumit nárazy a vibrace (Obal centrum 2022). Obalové materiály z nasávané kartonáže jsou využívány jako ochranné obaly, výdejní podnosy, nosiče nápojů, proložky od vajec, misky na ovoce a průmyslové obaly (Cho et al. 2009).

Existuje několik možností odstraňování nasávané kartonáže. Nejsnadnějšími možnostmi je recyklace a skládkování. Další způsoby odstraňování jsou kompostování a spalování. Materiály z nasávané kartonáže mají menší dopady na životní prostředí než jiné obalové odpady. Nasávaná kartonáž stále přitahuje větší pozornost na trhu díky své obnovitelnosti, udržitelnosti a biologické rozložitelnosti. Jedná se o možnou alternativu za jednorázové plastové obaly (Zhang et al. 2022).

3.2.4 Produkce a nakládání s odpadním papírem

Celulózový a papírenský průmysl vyrábí ročně přes 304 milionů tun papíru. V roce 2005 bylo pouze v Evropě vyrobeno 99,3 mil. tun papíru, který rovněž vyprodukoval 11 mil. tun odpadu. Produkce recyklovaného papíru ve stejném období činila 47,3 mil. tun, čímž vzniklo 7,7 mil. tun pevného odpadu (Basheer & Agrawal 2016).

Očekává se, že celosvětová produkce v celulózovém a papírenském průmyslu vzroste o 77 % a současně bude recyklováno více než 66 % vyrobeného papíru (Basheer & Agrawal 2016).

Papírenský průmysl není ekologicky bezpečný. Znečišťuje životní prostředí a vytvářejí se odpady, které se obvykle ukládají na skládky. Ukládání odpadu na skládky zabírá značné množství prostoru, ale také zvyšuje znečištění, které má za následek skleníkový efekt, klimatické změny, globální oteplování a ohrožení lidského zdraví. Větší produkce papíru znamená vyšší množství kácení stromů. Výrobu papíru nelze zastavit, ale lze vyvinout technologie ke snížení znečištění a zvýšit využití papírového odpadu (Basheer & Agrawal 2016). Bezpečné odstraňování a nakládání s papírovými odpady je výzvou pro papírenský průmysl. Ve většině papírenského průmyslu se podstatná část papírových odpadů spaluje za účelem energetického využití (Garg & Yadav 2011).

V každodenním životě vzniká značné množství papírového odpadu, zejména v kancelářích, různých podnicích a domácnostech. Skartovaný papír se používá pro balení a přepravu ovoce, zeleniny, potravin, rozbitných předmětů atd. Odpad z papíru a lepenky z tržnic se rovněž netřídí k recyklaci. Velké množství těchto odpadů je spolu s ostatními odpady odstraňováno na skládkách odpadů nebo spalováním (Basheer & Agrawal 2016).

3.3 Kompostování

Metoda kompostování je efektivní mikrobiální operace prováděná různými společenstvy, které rozkládají složité organické odpadní materiály. Jedná se o proces biologické recyklace. Kompostování je v rozvojových zemích přijatelný a ekonomický proces odstraňování odpadů. Způsob kompostování je rozdělen do tří fází. V první mezofilní fázi dochází k rozkladu určitých chemických sloučenin (např. různé aminokyseliny, cukry atd.). Mezofilními organismy dochází k zvýšení teploty v kompostu. Další fáze se nazývá termofilní, kde dochází k degradaci komplexních organických materiálů (ligninu, celulózy, tuků a hemicelulózy). K tomuto jevu dochází kvůli tepelně odolným mikroorganismům, které redukují organický uhlík během

termofilní fáze. Během poslední fáze dochází ke snižování teploty substrátu (Ananthanarayanan et al. 2021).

Kompostováním dochází k významnému poklesu celkového dusíku. Ztráty dusíku vznikají v důsledku zvýšené teploty termofilní fáze, vysokého obsahu amoniakálního dusíku a nárůstu pH. Ke ztrátě živin v kompostu dochází odtokem a vyplavováním materiálu. Další faktory, které výrazně ovlivňují proces kompostování jsou poměr uhlíku a dusíku, velikost odpadních částic, stabilita živin, vlhkost substrátu, poréznost, kyslík a teplota. Teplota je zásadním faktorem pro kompostování a má silný vliv na mikrobiální aktivity, ovlivňuje metabolické procesy mikrobů v substrátu. Houby, bakterie a další mikrobiální skupiny přeměňují složité organické materiály na stabilní kompost během kompostovacího procesu. Tito mikrobi silně stimulují proces mineralizace a mohou redukovat zápach (Ananthanarayanan et al. 2021). Během termofilní fáze vzrostou teploty až na 40–65 °C (Ndegwa & Thompson 2001). Vysoká teplota při kompostování eliminuje populace patogenních bakterií. V průběhu kompostování jsou eliminovány škodlivé plyny z kompostovací zakládky. Problémy se zápachem lze řešit správným provzdušňováním, otáčením kompostu a biofiltrací. Nedávné studie ukazují, že přidáním biouhlíku a účinných mikroorganismů se zlepšuje kvalita kompostu (Ananthanarayanan et al. 2021).

3.3.1 Podmínky pro kompostování

Pro úspěšný proces kompostování je potřeba určit správný poměr surovin. Optimální poměr surovin je pro hodnoty C:N mezi 35-30:1. Poměr C:N organických materiálů má výrazný vliv na kompostování (Ananthanarayanan et al. 2021).

Doba pro rozklad organických odpadů na zralý kompost závisí na poměru C:N, vlhkosti, teplotě, provzdušněnosti a vlastnostech materiálů (Ananthanarayanan et al. 2021).

Na základě experimentů má zralý kompost následující vlastnosti. Jeho pH je od 6 do 8, vlhkost je nižší než 65 %, poměr uhlíku a dusíku je menší než 15, poměr amoniaku k dusičnanu je menší než 0,5. Organická hmota je snížena o přibližně 38 % a počet fekálních bakterií se výrazně snížil (Ghorbani & Sabour 2021).

3.3.2 Způsoby kompostování

Rozlišujeme několik způsobů kompostování. První proces zahrnuje kompostování na volné ploše. Jedná se o nejstarší způsob kompostování. Do této skupiny spadá kompostování v plošných a pásových zakládkách. Využívá se ve velkých kompostárnách, kde se nakládá se značným množstvím biologicky rozložitelných materiálů. Haldy se zakládají do výšky až 5 metrů a provzdušňují se pomocí překopávačů. Kompostování v pásových zakládkách je řízený systém a zahrnuje vysoký stupeň mechanizace. Je to nejrozšířenější způsob kompostování. V pásových zakládkách jsou zakládky formovány do trojúhelníkového nebo lichoběžníkového tvaru. Délka zakládky je závislá pouze na dostupnosti volné plochy. Druhý způsob kompostování je v uzavřených zařízeních. Využívají se k tomu bioreaktory nebo kompostování v boxech a žlabech. Nedochozí k ovlivňování klimatickými podmínkami ani jinými rušivými vlivy. U těchto technologií jsou sledovány údaje, které mají vliv na průběh procesu a jsou analyzovány pomocí přístrojů a záznamových zařízení. Systém je zpětně řízen a upravován na základě zjištěných hodnot. Pořizovací náklady na uvedené technologie jsou podstatně vyšší než u kompostování v plošných a pásových zakládkách (Plíva et al. 2009).

Třetí skupina je kompostování ve vacích. V podstatě se jedná o kompostování v pásových zakládkách překrytými polyetylenovými vaky. Vytvářejí se pouze na zpevněných plochách a celý proces trvá 6–8 týdnů (Plíva et al. 2009).

Poslední typ je technologie vermikompostování, která bude podrobněji popsána v další kapitole (Plíva et al. 2009).

3.4 Vermikompostování

Jednou z levných a ekologicky šetrných metod k životnímu prostředí je kompostování za pomoci žížal, tedy vermikompostování. Vermikompostování je biotechnologický proces kompostování širokého spektra organického odpadu, který zahrnuje specifické druhy žížal, které zvyšují rozklad odpadu na velmi užitečný, vysoce kvalitní konečný produkt známý jako vermikompost (Vuković et al. 2021). Rychlá biodegradace organického odpadu během vermikompostování je výsledkem interakce mezi žížalami a mikroorganismy. Mikroorganismy jsou zodpovědné za stabilizaci biologických procesů v půdním roztoku. Dále se podílejí na oběhu organických a anorganických látek v půdě. Jeden gram vermikompostu obsahuje až 2000 miliard bakterií (Przemieniecki et al. 2021). Závislý vztah mezi žížalami a mikroorganismy je nezpochybnitelný. Zejména díky fyzickým aktivitám žížal při provzdušňování a míchání substrátu dochází ke zvýšení dostupné plochy pro osídlení mikroorganismů. Dále žížaly ovlivňují strukturu, složení, aktivitu a rychlost růstu mikroorganismů (Vuković et al. 2021).

Kromě výše zmíněných mikroorganismů interagují žížaly i s jinými organismy v půdě. Žížaly ovlivňují různá společenstva mikrobiota a mikrofauny (Vuković et al. 2021). Žížaly snadno přemění živiny v organických složkách. Živiny snadno rozpustné ve vodě jsou potom dostupnější pro rostliny. Vermikompost poskytuje rostlinám makro a mikro živiny včetně biologicky aktivních látek, jako jsou regulátory růstu rostlin (Karmakar et al. 2012).

Různé organické látky mají různou strukturu, obsah živin a složky, které mohou ovlivnit vývoj a výkonnost žížal (Suthar 2007). Tyto faktory mohou také ovlivnit množství a kvalitu vytvořeného vermikompostu. Yan et al. (2013) zjistili, že živiny v původním organickém materiálu ovlivňují obsah živin vermikompostu (Sarker & Kashem 2020).

Během vermikompostování se obsažené živiny v organickém odpadu mění na jednoduché a snadno dostupné formy. Jedná se o dusičnany nebo amonný dusík, fosfor, draslík, vápník a hořčík. Bylo prokázáno, že jemnější vermikomposty uvolňují více dusíku a fosforu než hrubší vermikomposty (Przemieniecki et al. 2021).

Žížaly dokážou rozložit tuhý komunální odpad, domácí odpad, zahradní odpad, živočišný odpad, městský a průmyslový kal z čistíren. Využívají se jako biologické adsorbenty při detoxikaci a čištění půdy od těžkých kovů, odolných uhlovodíků a některých organických pesticidů (Amouei et al. 2017).

Při vermikompostování není zajištěno odstranění patogenů, protože teplota je vždy v mezofilním rozmezí, ačkoliv některé studie poskytly důkazy o potlačení patogenů ve vermikompostu (Mupondi et al. 2010).

Pro kvantifikaci dynamiky procesu vermikompostování je proto nezbytné specifikovat různé fyzikálně–chemické charakteristiky. Jedná se o pH, elektrickou vodivost, organický uhlík, celkový dusík, celkový a dostupný fosfor, celkový draslík, obsah kovů atd. (Yadav & Garg 2011).

3.4.1 Fáze vermikompostování

Proces vermikompostování lze rozdělit do dvou různých fází. První fáze se nazývá aktivní fáze. Žížaly a mikrobiota pracují společně v odpadních materiálech a podporují proces mineralizace. Druhá část je fáze zrání. Žížaly vyvrhují své výměšky a tím vytvářejí nové vrstvy ve vermikompostovaných zakládkách. Doba aktivní fáze závisí na hmotnosti žížal a druhu žížal.

Dále závisí délka druhé fáze na typech odpadních materiálů, na jejich úpravě a vlastnostech. Fyzikálně–chemické a biologické parametry odpadů mohou změnit procesy související s trávením materiálu ve střevech žížal. Tyto procesy jsou homogenizace, metabolismus, katabolismus, mikrobiální aktivity atd. (Ananthanarayanan et al. 2021).

3.4.2 Faktory ovlivňující vermikompostování

Úspěch procesu vermikompostování závisí na mnoha abiotických a biotických faktorech. Některé z těchto faktorů jsou uvedeny v dalších kapitolách (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1 Abiotické faktory

Mezi nejdůležitější abiotické faktory, které ovlivňují proces vermikompostování, patří vlhkost, pH, teplota, provzdušňování, kvalita materiálu, světlo, poměr C:N atd. (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.1 Obsah vlhkosti

Vlhkost je jednou z nejdůležitějších podmínek nezbytných pro úspěšnou symbiózu mezi žížalami a mikroorganismy ve vermikompostovacím systému. Žížaly dýchají celým povrchem těla, proto musí mít podmínky pro optimální obsah vlhkosti. Ideální poměr vlhkosti je mezi hodnotami 60–80 %, ale fyzikální a chemické rozdíly ve vstupních surovinách mohou způsobit mírné odchylky. Bylo zjištěno, že i 5% rozdíl v obsahu vlhkosti významně ovlivňuje vývoj klitelu u žížal druhu *Eisenia fetida*. Voda má další důležitou funkci jako médium pro různé chemické reakce a transport živin během vermikompostování (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.2 pH

Ukazatel pH je dalším důležitým parametrem, který výrazně ovlivňuje proces vermikompostování. Přijatelné rozmezí pH, které je vhodné pro aktivitu žížal a mikroorganismů, bývá v rozmezí 5,5 – 8,5. Optimální pH substrátu je neutrální nebo téměř neutrální. Při vermikompostování dochází k výrazným změnám pH (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.3 Teplota

Optimální teplotní podmínky pro žížaly se pohybují kolem 12–28 °C během vermikompostování. Aktivita žížal je výrazně ovlivněna teplotou. V zimě musí být teplota nad 10 °C, aby vermikompostování zůstalo aktivní. S poklesem teploty dochází ke snížení rozmnožování a snižuje se metabolická aktivita. Žížaly nepřijímají potravu při velmi nízkých teplotách. V létě nesmí teplota přesáhnout 35 °C. Při vyšší teplotě začíná klesat metabolická aktivita i proces rozmnožování. V konečné fázi dochází k úmrtí žížal. Tolerance a preference na teplotě jsou různé u každého druhu žížal (Garg & Yadav 2011). Podle vyhlášky č. 273/2021 o podrobnostech nakládání s odpady, ve vermikompostárnách dochází k měření teploty v základce třikrát týdně v pracovní den při zpracovávání biologicky rozložitelných odpadů. Zjištěné hodnoty i doba měření těchto výsledků musí být zaznamenány (Ministerstvo životního prostředí 2004).

3.4.2.1.4 Provzdušňování

Žížaly jsou aerobní organismy, proto potřebují ke své aktivitě kyslík. Spotřeba kyslíku v kompostu je příčinou mikrobiální aktivity a činností žížal. Množství kyslíku také souvisí s teplotou v substrátu. Při vermikompostování může nadměrná vlhkost způsobit špatné provzdušňování a ovlivnit dostupnost kyslíku pro žížaly. Také mastné a olejové odpady ve

větším množstvím narušují přísun kyslíku v substrátu. To je jeden z hlavních důvodů, proč nepřidávat do kompostu mastné a olejové odpady bez předkompostování. Pro lepší provzdušnění za nepříznivých podmínek se používají mechanická zařízení nebo ruční překopávání kompostu (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.5 Kvalita materiálu

Pro správný proces vermikompostování je důležitý výběr krmného materiálu. Žížaly mohou spotřebovat většinu organických materiálů. Množství spotřebovaného substrátu ovlivňuje řada faktorů. Jedná se například o velikost částic potravy, v jakém stádiu rozkladu se materiál nachází, poměr C:N, obsah soli v potravě atd. Menší částice materiálu zajistí žížalám snadný příjem potravy a dojde k urychlení procesu vermikompostování. Žížala denně přijme potravu v rozmezí od 100 do 300 mg/g tělesné hmotnosti. Žížaly získávají důležité živiny z organických materiálů, živých mikroorganismů a rozkladem makrofauny. Žížaly jsou velmi citlivé na obsah solí v půdě a potravě, proto krmivo může obsahovat maximálně 0,5 % soli. Ideální krmivo pro žížaly nesmí obsahovat žádné biologicky nerozložitelné nebo toxické látky. Jedná se zejména o tyto suroviny např. inertní materiály, plasty, sklo, kovové předměty, detergenty, léčiva atd. Zmíněné látky způsobují riziko pro žížaly nebo nebezpečí prostřednictvím jejich metabolických produktů (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.6 Světlo

Žížaly jsou fotofobní organismy, proto se nejraději vyskytují mimo dosah světla. Krátká expozice slunečního záření způsobuje částečnou nebo úplnou paralýzu. Při dlouhé expozici slunečního záření dochází k úmrtí žížaly. Žížaly mají světlocitlivé kožní buňky, které používají k rozeznání světla, aby se od něj mohly vzdálit (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.1.7 Poměr C:N

Poměr uhlíku a dusíku zásadně ovlivňuje vývoj a rozmnožování žížal ve vermikompostech. Při vyšším poměru C:N dochází ke zvýšení schopnosti rozmnožování a růstu žížal. Správný poměr C:N je důležitý pro degradaci odpadu, pokud je vyšší nebo nižší C:N, zpomalí se rozklad odpadu. Přítomnost mikrobů hraje důležitou roli v procesu vermikompostování. Mikrobi potřebují uhlík pro svůj růst a dusík pro syntézu bílkovin. Pro efektivní proces vermikompostování je vyžadován optimální poměr C:N (Garg & Yadav 2011). Uhlíkaté látky jsou zdrojem pro mikroorganismy. Materiály bohaté na uhlík jsou sláma, piliny, odpady z cukrové třtiny, papírenský odpad a sběrový papír. Tyto odpady potřebují delší dobu degradace, optimální vlhkost a provzdušňování. Dále vyžadují přidání odpadu bohatého na dusík. Dusíkaté látky jsou důležité pro syntézu aminokyselin, peptidů a bílkovin. Materiály obsahující velké množství dusíku jsou kozí hnůj, prasečí hnůj, drůbeží exkrementy, kejda a čistírenské kaly (Basheer & Agrawal 2016).

3.4.2.2 Biotické faktory

Biotické faktory zásadně ovlivňují proces vermikompostování. Hlavními biologickými faktory jsou hustota osazení žížal, mikroorganismy, enzymy atd. (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.2.1 Hustota populace žížal ve vermikompostovací základce

Žížaly jsou nejdůležitějším prvkem ve vermikompostování, ovlivňují mikrobiální společenství a dynamiku živin. Populace žížal má vliv na různé fyziologické procesy. Mezi zmíněné procesy patří rychlost dýchání, rychlost reprodukce, příjem potravy a fragmentace vermikompostovací základky. Populační hustoty žížal ve vermikompostovací základce se

mohou lišit na základě různých druhů žížal. Dvě studie uvádějí, že se zvyšuje úmrtnost populace při vyšší hustotě žížal a dochází k nižší produkci kokonů. Dominguez & Edwards (2000) popisují, že ve větší hustotě žížaly rostou pomaleji, i když mají optimální podmínky ve vermikompostovacích zakládkách. Každopádně velká hustota žížal způsobuje rychlou degradaci organického materiálu. Optimální hustota žížal ve vermikompostovací zakládce činí 1,60 kg žížal/m². Při zakládání vermikompostovací zakládky je nezbytné udržovat optimální hustotu žížal, aby se dosáhlo maximálního růstu populace a reprodukce při krátké době (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.2 Mikroorganismy

V organických odpadních materiálech se přirozeně vyskytují mikroorganismy, které za ideálních podmínek pomáhají při rozkladu organických odpadů. Složení společenstev mikroorganismů závisí na složení odpadních složek procházejících procesem vermikompostování (Frederickson et al. 2007). Bakterie jsou zodpovědné za produkci účinných antibiotik proti fytopatogenům. Jeden gram vermikompostu obsahuje až 2000 miliard bakterií patřících do skupiny Bacterioides, Gammaproteobacteria, Deltaproteobacteria, Actinobacteria, Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria, Chloroflexi, Firmicutes, Acidobacteria, Gemmatimonadetes, Verrucomicrobes a Plantha (Przemieniecki et al. 2021). Při vermikompostování dochází ke stabilizaci organické hmoty vzájemnou interakcí mezi žížalami a mikroorganismy. Mikroorganismy nejen mineralizují komplexní látky do dostupné formy pro rostliny, ale také syntetizují biologicky aktivní látky (Garg & Yadav 2011).

3.4.2.3 Enzymy

Chemické organické odpady jsou velmi složité a jejich stabilizace vyžaduje působení enzymů. Žížaly vylučují ve svém žaludku a střevech enzymy, které způsobují rychlou biochemickou přeměnu celulóзовých a bílkovinných materiálů v organických odpadech. Celulózy depolymerují celulózu, b-glukosidázy, hydrolyzují glykosidy, proteázy a ureázy, odstraňují fosfátové skupiny z organické hmoty. Enzymy jsou ve skutečnosti katalyzátory důležitých metabolických funkcí, včetně rozkladu a detoxikace kontaminantů (Garg & Yadav 2011).

3.4.3 Rozdíl mezi kompostováním a vermikompostováním

Primárním rozdílem mezi vermikompostováním a kompostováním je přítomnost a využití žížal při daném procesu. Interakce mezi žížalami a mikroorganismy urychluje proces přeměny třikrát ve srovnání s klasickým kompostováním. Poslední roky se rozvíjí technologie biologického rozkladu a nejvhodněji se jeví možnost likvidace organického odpadu právě za pomoci žížal (Jiacong et al. 2021).

V tradičním termofilním kompostování musí být organický materiál pravidelně otočen nebo provzdušněn jiným způsobem, kvůli zachování aerobních podmínek. Provzdušnění kompostů zahrnuje těžké a drahé vybavení. Žížaly přežijí pouze za aerobních podmínek ve vermikompostovacích zakládkách. Žížaly plní roli otáčení a udržování materiálu v aerobním stavu, tím pádem není potřeba drahého vybavení. Výsledný produkt z vermikompostu je homogenní a může mít navíc snížené hodnoty kontaminantů v substrátu. Vermikompost je kvalitnější materiál než výstup klasického kompostování (Ndegwa & Thompson 2001).

Hlavní nevýhodou vermikompostování je absence termofilní fáze na rozdíl od tradičního kompostování, kde termofilní bakterie mohou zvýšit teplotu materiálu na více než 70 °C. Ve vermikompostech musí být teplota udržována pod 35 °C (Ndegwa & Thompson 2001).

3.4.4 Historie vermikompostování

Vermikompostování stejně jako klasické kompostování má dlouhou historii, která je známa po staletí. Nejstarší zmínky se nacházejí v sanskrtských dílech Rishi Parashara. Aristoteles a Charles Darwin popsali žížaly dostatečně podrobně. Aristoteles je nazval „střevem Země“ a Darwin je nazval „Oráč přírody“ (Basheer & Agrawal 2016).

Větší rozsah záznamů o vermikompostování se datuje ve 30. a 40. letech 20. století, kdy se komposty zakládaly kvůli velkému množství žížal za účelem chovu rybářských návnad. Při tomto procesu se začaly zkoumat další alternativy využití žížal v kompostování (Knight 1989).

Toto odvětví pochází z Kanady, ale v současné době jsou zařízení s vermikomposty v několika zemích. Jedná se především o Kanadu, USA, Itálii, Japonsko atd. (Ghorbani & Sabour 2021).

V sedmdesátých letech odstartovalo Japonsko první nakládání se zemědělskými odpady za pomoci žížal a začalo vytvářet první vermikomposty. Tento proces zpracování bioodpadů se potom začal postupně šířit v USA a Evropě (Ghorbani & Sabour 2021).

V České republice se začalo používat vermikompostování od roku 1985 (Kalina 2004). Do České republiky se dostaly zmínky o metodě zpracování organických odpadů za přítomnosti žížal ze západní Evropy. Tyto nové informace měly neurčité představy o praktickém použití a enviromentálním efektu (Zajonc 1992).

Slavný vědec zabývající se žížalami Satchell (1967) napsal: „Nádherná živá zoo žížal pod našima nohama je aktivní ve dne i v noci, tiše a tajně provádí práci rozkladu a humifikace pohřbíváním organických materiálů, mícháním anorganických a organických látek. Žížaly jsou všežravé, ale často selektivní ve svých stravovacích návycích“ (Basheer & Agrawal 2016).

3.4.5 Předkompostování

Jedná se o tepelný rozklad biomasy pro účinnější zpracování žížalami pro vermikompostování s účelem eliminovat látky, které jsou pro vermikompostování toxické. Jsou to například čpavek, metan, soli a pesticidy (ČSN 465736). Při vermikompostovacím procesu se používá tento způsob, kdy v základní hromadě dochází k termofilní fázi. Po proběhnutí termofilní fáze se zakládá nová hromada s přidáním žížalí populace (Hanč & Plíva 2013).

Při procesu dochází k výraznému nárůstu teploty, která se pohybuje kolem 50–70 °C. Tyto teploty nejsou možné při vermikompostování, protože při teplotě nad 35 °C dochází k hynutí žížal. Mezi patogenní organismy, které se odstraňují při termofilní fázi jsou *Escherichia Coli*, *Salmonella* sp., enterokoky atd. (Suthar 2010).

Doba potřebná pro předkompostování je závislá na množství odpadu a obsahu látek, které se redukuje během procesu. Předkompostování bioodpadu trvá v laboratorních fermentorech přibližně 14 dní (Hanč & Plíva 2013).

Podle norem se předkompostování musí aplikovat pokaždé, kdy jsou vstupní suroviny do procesu znečištěny patogenními organismy (ČSN 465736). Předkompostování umožňuje stabilizaci, hygienizaci čistírenských kalů a udržení živin v konečném produktu (Kulikowska et al. 2022).

3.4.6 Kombinace kompostování a vermikompostování

Tyto dvě metody mají své vlastní výhody a nevýhody. Kombinace obou metod vede ke zvýšení účinnosti procesu, získání lepších vlastností, kvalitnějšího konečného produktu a odstranění znečišťujících látek (Ndegwa & Thompson 2001).

Kompostování a vermikompostování jsou dva z neznámějších procesů biologické stabilizace pevných organických odpadů. Kombinace kompostování a vermikompostování získává stále větší pozornost jako způsob dosažení stabilizovaných substrátů. Kompostování umožňuje sanitaci odpadů a eliminaci toxických sloučenin, zatímco vermikompostování snižuje velikost částic a zvyšuje dostupnost živin (Mupondi et al. 2010).

Kombinované kompostování a vermikompostování bylo studováno s bioodpadem, kuchyňským odpadem smíchaným, odpadním papírem a kravským hnojem. Ale o účinnosti kombinovaného kompostování a vermikompostování na biologickou stabilizaci odpadního papíru je jen málo informací (Mupondi et al. 2010).

Roste zájem o využití kombinovaných kompostovacích systémů s vermikompostováním, které jsou navrženy pro dosažení specifických technických cílů. Cílem je výroba vysoce specifických kompostů nebo vysoce kvalitních produktů v souladu s environmentální legislativou. Například ve Spojeném království se zavedením nařízení o vedlejších živočišných produktech nyní zakazuje použití vermikompostování ve velkém měřítku ke zpracování kuchyňského odpadu obsahujícího maso bez předchozí hygienizace pomocí uzavřeného kompostování (Frederickson et al. 2007).

3.4.7 Způsoby vermikompostování

Vermikompostování se dělí na různé provozní systémy podle technologických postupů na maloprodukční a velkoprodukční. Maloprodukční vermikompostování se využívá při zpracování odpadů z domácností. Jedná se především o kuchyňské zbytky. Velkoprodukční vermikompostování je realizováno díky jednoduchým technologickým systémům. Do této skupiny patří vermikompostování na volné ploše nebo vermikompostování v uzavřených prostorech. Poslední způsob se nazývá vermikompostování v boxech. Složitější technologie vermikompostování zahrnují dvoumodulové vermireaktory nebo vermireaktory s kontinuálním procesem (Plíva et al. 2016).

3.4.7.1 Malé vermikompostéry

Mezi maloprodukční vermikompostování patří kompostování v malých vermikompostérech, které jsou v zakrytých nádobách. Jejich využití je především v domácnostech nebo firemních budovách, proto se nazývají domácí vermikompostéry. Pro jejich výrobu se nejčastěji používá plast nebo dřevo. Vyrábí se jako patrové konstrukce, kde dochází k přeměně bioodpadů v jednotlivých sekcích (Hanč & Plíva 2013).

Nejvhodnější místa na umístění vermikompostérů jsou chodby ve firmách, dílny, balkóny v domácnostech, garáže, kuchyně (Plíva et al. 2016).

Objem dna nádoby je závislý na množství materiálu, který bude přeměňován. Uvádí se, že na 1 kg odpadního materiálu je nutné přibližně 0,2 m² plochy dna nádoby. Jednotlivá patra mají zajištěný odvod odpadní vody. Žížaly se mohou pohybovat volně mezi jednotlivými nádobami (Hanč & Plíva 2013).

Ve spodní části se nachází zásobník s vypouštěcím ventilem, který odvádí přebytečnou odpadní vodu mimo vermikompostér. Odpadní voda může být opětovně vrácena do vermikompostéru (Plíva et al. 2016).

3.4.7.2 Jednoduché technologie vermikompostování

Do jednoduchých technologií vermikompostování patří plošné vermikompostování. Zmíněný technologický systém obsahuje vermikompostování v pásových zakládkách s volnou plochou nebo vermikompostování s ohraničenými záhony (Hanč & Plíva 2013).

3.4.7.2.1 Vermikompostování v pásových zakládkách na volné ploše

Vytvoření vermikompostovatelných materiálů do dlouhých řad nebo zakládek je nejjednodušší a nejvíce používaný způsob vermikompostování ve velkém množství bioodpadů. (Plíva et al. 2016). Hromady jsou zakládány v terénu, na betonových podkladech, nebo izolačních foliích (Zajonc, 1992). Vermikompostování v pásových zakládkách není finančně náročné a pro úspěšný provoz není potřeba složité techniky. Zakládky se nepřekopávají, protože překopávání a fragmentaci materiálu zajišťují žížaly. Při nedostatku vlhkosti je potřeba zakládky zavlažovat, proto se sleduje vlhkost během celé přeměny materiálu. V literatuře uvádějí, že vhodné rozmístění žížal je kolem 50 tisíc na m² plochy dané zakládky (Plíva et al. 2016).

Nejběžnějším používaným vermikompostováním na volné ploše je způsob, který se nazývá přikrmování žížal. Kompostovatelný materiál je přidáván na zakládku ve vrstvách. Žížaly se postupně přesouvají do vrstev, kde se nachází potrava a konzumují materiál. Přibližně 20 cm materiálu se vrství na zakládku jednou za dva týdny. Nevýhoda této metody je zajištění pracovních úkonů pro krmení žížal (Hanč & Plíva 2013).

Žížaly se odebírají dvěma způsoby. První metoda je odebrání horní vrstvy zakládky, která obsahuje žížalí substrát a dále vytvoření nové zakládky pro další vermikompostování. Druhý způsob je navezení nové zakládky vedle té zpracovávané žížalí populací. Nová zakládka obsahuje nový kompostovatelný materiál a žížaly postupně přelézají do nové zakládky za potravou. Při obou způsobech odběru jsou předpokládány určité ztráty žížal (Plíva et al. 2016).

3.4.7.2.2 Vermikompostování v ohraničených záhonech

Tento druh vermikompostování se realizuje na volném prostranství. Tato metoda je uplatňována většinou pod zastřešenými prostory. Postavené záhony z části eliminují povětrnostní podmínky a tím prodlužují vermikompostování v chladnějších podmínkách (Hanč & Plíva 2013). Záhony jsou široké kolem dvou metrů, protože větší plocha je náročná na kontrolu a manipulaci. Délka záhonů je omezena velikostí a podmínkami na prováděné ploše (Zajonc 1992). Hlavní podmínkou a nevýhodou procesu je udržení dané vlhkosti při teplejších obdobích. Ideální sklon pro nezastřešené záhony je v rozmezí mezi 2° až 3°, protože dochází k bezpečnému odvodnění přebytečné vláhy v kompostu (Plíva et al. 2016).

Pro optimální průběh procesu je vhodné použití ochranných prostředků. Překrývá se horní vrstva zakládky proti přirozeným nepřítelům žížal, jako jsou ptáci, žáby, stonožky, mravenci a hlodavci (Plíva et al. 2016).

3.4.7.3 Složitější technologie vermikompostování

Složitější technologie vermikompostování jsou realizovány v zařízeních, které se zabývají nakládáním s bioodpady v uzavřených prostorách za pomoci určitého druhu žížal. Jedná se především o druhy *Eisenia fetida* a *Eisenia andrei*. Hlavní výhody těchto technologií

jsou značné urychlení celého procesu a snížení potřebného prostoru pro vermikompostování. Mezi další výhody patří omezení povětrnostních vlivů, lepší využití výluhu z vermikompostu a celková automatizace procesu (Hanč & Plíva 2013).

V současné době má mnoho vermikompostův technologii monitorování určitých fyzikálních veličin, které mohou ovlivňovat zpětně průběh vermikompostování v daných podmínkách (Hanč & Plíva 2013).

3.4.7.3.1 Vermikompostování ve dvoumodulovém vermireaktoru

Tento vermireaktor byl navržen a vytvořen pracovníky, kteří pracovali pro Výzkumný ústav zemědělské techniky a Českou zemědělskou univerzitu. Dvoumodulový vermireaktor je umístěn v menze na České zemědělské univerzitě. Zařízení je založeno na principu dvou komor z důvodu zamezení zvýšení teploty vstupního materiálu v přítomnosti žížalí populace, tím dochází k lepší konzumaci materiálu žížalami a ke zrychlení procesu, lepší hygienizaci, a dosažení optimálních podmínek pro vermikompostování. V prvním modulu probíhá fáze předkompostování surovin a ta zahrnuje termofilní fázi rozkladu bioodpadu. Materiál z první kóje je přendán do druhého modulu i s žížalím materiálem. Ve druhém modulu probíhá fáze vermikompostování (Plíva et al. 2016).

3.4.7.3.2 Vermikompostování ve vermireaktorech se souvislým procesem

Nejlepší způsob velkoprodukčního vermikompostování v uzavřených prostorech je pomocí kontinuálních vermireaktorů. Tento proces přeměňuje bioodpady od horní části až do dolní části reaktoru. Kompostovatelný materiál se umísťuje na horní část zařízení pomocí upraveného rozmetadla a mobilního portálu. Obě části jsou rozděleny hydraulickou záklopkou. Hotový vermikompost se dostává do dolní části reaktoru přes síto. Proces je plně automatizován a řízen podle sledovaných údajů. Vermikompostování v kontinuálním vermireaktoru je realizováno po celý rok, protože systém je umístěn v krytých halách a není ovlivňován klimatickými podmínkami. Zmíněný systém vermikompostování je výhodný k neustálému získávání velice kvalitního vermikompostu (Plíva et al. 2016).

3.4.8 Výsledné produkty vermikompostování

Z procesu vermikompostování vznikají tři produkty. Jedná se o vermikompost, výluhy a samotné žížaly. Konečné produkty vermikompostování jsou bohaté na různá mikrobiální společenství, jako jsou stabilizátory fosfátů, fixátory N_2 , bakterie produkující enzymy a podporující růst rostlin (Vuković et al. 2021). Mnoho prvků ze vstupních surovin se mění na formy, které mohou rostliny snadněji přijímat, jako například dusičnany, fosfor, rozpustný draslík, vápník a hořčík (Arancon et al. 2003).

Konečné materiály vykazují zvýšené nutriční vlastnosti s prokázaným využitím pro zemědělské účely (Granuly & Chakraborty 2019). Další využití mají konečné produkty v zahradnictví jako hnojiva pro okrasné dřeviny a rostliny (Vuković et al. 2021).

Produkty lze využít ve všech zemědělských systémech, kde jsou problémy s hnojením plodin nebo problémy s půdou. Použití produktů z vermikompostu vede k zajištění přísunu živin. Účinně nahradí chemická hnojiva a nemají vliv na ekologické procesy v půdě nebo krajině (Ghorbani & Sabour 2021). Vermikompost a výluhy mají další pozitivní vlastnosti oproti minerálním hnojivům, která byla nesprávně používána. Během let zničila vlastnosti půdy a snížila její přirozenou úrodnost (Sarker & Kashem 2020). Substráty z vermikompostu mají také lepší vlastnosti než hnůj od zemědělských zvířat (Ghorbani & Sabour 2021).

3.4.8.1 Vermikompost

Konečný produkt po vermikompostování označujeme jako vermikompost. Vermikomposty jsou jemně rozmělněné materiály podobné rašelině s vysokou porézností a obvykle obsahují více minerálních prvků (Arancon et al. 2003). Po vysušení materiálu vypadá jako jemná lesní půda. Je velice drobivý a není cítit žádným zápachem (Kalina 2004). Vlastnosti, které dělají z vermikompostu účinné hnojivo jsou homogenita, vysoká poréznost, vysoká schopnost zadržovat vodu, stabilita, nízký poměr C:N. Vermikompost je čistě ekologický materiál bohatý na živiny (Vuković et al. 2021). Hlavní vlastnosti jsou především velká vodní kapacita vermikompostu a velké množství mikroorganismů, které pozitivně ovlivňují životní funkce rostlin (Kalina 2004).

Jak bylo zmíněno, vermikompostování má široké spektrum účinků na rostliny a většina z nich je velice prospěšná. Obecně lze říct, že vermikompost zlepšuje růst, výnos a kvalitu pěstovaných rostlin. Všechny příznivé účinky vermikompostu zahrnují stimulaci vývoje kořenů a výhonků, zvýšení klíčivosti semen, listové plochy, větvení kořenů, výnos plodů, nutriční kvalitu, stimulaci kvetení rostlin, ovlivnění biomasy, fotosyntézy a rychlosti dýchání (Vuković et al. 2021).

Pomocí vermikompostu dochází ke zrychlení dozrávání plodin o 1 až 2 týdny. Bylo zjištěno, že přidání vermikompostovaného materiálu zvýšilo dvou i vícenásobně množství vitamínu C v běžných rostlinách ve srovnání s variantou bez hnojiva (Zajonc 1992).

Podle většiny známé literatury vyvolávají různé typy vermikompostu vyšší klíčivost, růst rostlin a výnos u mnoha druhů rostlin. Např. se jedná o rajčata, salát, okurku, tymián, begonie, cukrovou třtinu a mátu (Vuković et al. 2021).



Obrázek č. 1: Vermikompost (<https://www.petrdivacky.cz/vermikompost-50l/>)

3.4.8.2 Výluhy

Vermikompostové výluhy, nazývané také žízalí čaje, jsou známější v posledních letech. Mají podobné vlastnosti jako vermikompost. Výluh obsahuje minerály, enzymy a huminové kyseliny (Vuković et al. 2021). Mezi aktivní složky vermikompostového výluhu se řadí mikroorganismy a rozpustné růstové hormony produkované mikroorganismy. Dále obsahuje materiály, které zlepšují dostupnost mikroživin (Edwards et al. 2010). Dochází k jeho uvolňování po celou dobu vermikompostování (Vuković et al. 2021). Výluh se využívá

k přihnojování rostlin nebo se může vrátit zpět k zavlažování vermikompostované zakládky. Bylo zjištěno, že při aplikaci výluhů dochází ke zvýšení výnosů rostlin. Dále se výluhy používají jako preventivní ochrana proti chorobám při pěstování květin a zeleniny (Kalina 2004). Přímá aplikace vermikompostového výluhu na listy rostlin poskytuje velké množství živin, které jsou využity rostlinami. Pěstitelé uvádějí, že mají pozitivní účinky na vitalitu rostlin, lámání pupenů, barvu plodů, objem kořenů a odolnost vůči chorobám. Vermikompostové výluhy se nyní používají v zemědělství, vinařství, sadech, zahradnictví, školkách, travnatých plochách, na terénní úpravách a v zahradách (Edwards et al. 2010).



Obrázek č. 2: Výluh z vermikompostéru (<https://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/rady-a-navody/elixir-pro-rostliny-jak-zizali-caj-podporuje-jejich-rust-a-odolnost>)

3.4.8.3 Žížaly

Z procesu vermikompostování získáme kromě přeměněného organického odpadu také velké množství žížal. Žížaly se dají využít dále do dalších vermikompostovacích zakládek. Jedná se o celé populace, které se vyvinuly v kompostovací zakládce. Žížaly se také využívají pro krmení drůbeže, ryb nebo prasat (Zajonc 1992). Další uplatnění žížal je ve farmacii a kosmetice. V poslední době se zvyšuje výzkum léčiv pocházejících z žížal, známý jako zelená biomedicína. Díky tomu se žížaly staly mezinárodním lékem, přestože jejich původní využití v tradiční medicíně je známé již tisíce let. S rozvojem biomedicíny vědci znovu objevili léčivou hodnotu žížal související s mnoha chemickými složkami, včetně proteáz žížal (lumbrokináza, kolagenáza, superoxidodismutáza, cholinesteráza, katalázy, glykosidázy), které pomáhají proti zánětlivým onemocněním, podporují hojení ran, léčbu poškozené kůže, či kardiovaskulární funkci atd. Žížaly produkují bílkoviny, které vážou kovy. Jedná se o metalothionein a kalmodium. Dále vytvářejí aktivní proteiny, které zlepšují svou aktivitou proliferaci, jedná se o lysenin, eiseniapor, protinádorové proteiny a glykoprotein (Li et al. 2011).

3.4.9 Hubení škůdců a chorob pomocí vermikompostu

Rychlý růst světové populace vyžaduje mnohem vyšší zemědělskou produkci k uspokojení základních lidských potřeb. Zemědělství ve světě se potýká s mnoha problémy v rostlinné produkci. Mezi tyto problémy patří choroby rostlin a škůdci rostlin (Vuković et al. 2021).

Aplikace chemikálií přináší pozitivní výsledky, pokud jde o eliminaci rostlinných škůdců. Chemikálie ovšem způsobují několik negativních vedlejších účinků pro půdu i rostliny. Jedná se o znečišťování životního prostředí, narušování přirozené úrodnosti půdy a eliminaci

užitečných organismů. V posledních letech byl jako alternativa za minerální hnojiva zmiňován vermikompost. Vermikompost totiž také chrání rostliny před rostlinnými škůdci, patogeny a chorobami (Vuković et al. 2021).

Potlačování rostlinných chorob je nejvýznamnější vlastnost vermikompostu. Další důležitou vlastností je funkce střevních enzymů žížal, které zabíjejí parazity přítomné v odpadních materiálech (Vuković et al. 2021). Je důležité zmínit, že vermikompostování přispívá k redukci rostlinných, lidských a živočišných patogenů (Vuković et al. 2021).

Roubalová et al. (2020) pozorovali redukci patogenů, jako jsou *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. a termotolerantní koliformní bakterie v matolinách během vermikompostování. Existuje několik způsobů, jak žížaly přispívají k redukci patogenů včetně bakterií, hub a mnoha dalších. Střevní enzymy žížal zabíjejí parazity přítomné v odpadu. Monroy et al. (2009) zaznamenali pokles počtu háďátek v prasečí kejďě po průchodu střevem žížal. K poklesu došlo v důsledku trávení hlístic proteolytickými enzymy přítomnými ve střevech žížal. Střevní enzymy mají antimikrobiální, proteolytické, hemolytické a antimykotické účinky (Vuković et al. 2021).

3.5 Žížaly vhodné pro vermikompostování

Při vermikompostování se používají různé druhy žížal. Mezi tyto druhy patří *Eisenia andrei*, *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus*, *Dendrobaena veneta*, *Dendrodrilus rubidus* a *Lumbricus rubellus*. Druhy žížal se vybírají do procesu podle odpadu, metody kompostování a prostředí. Žížaly jsou schopny spotřebovat velké množství biologicky rozložitelných odpadů. Stupeň rozptýlení žížal se mění s hloubkou ve vermikompostovaných zakládkách (Yilmaz & Agdag 2020).

Nejčastější otázky při vermikompostování jsou: jaké žížaly je možné použít pro vermikompostování a jaké jsou rozdílnosti mezi danými druhy (Zajonc 1992). Žížaly vhodné pro vermikompostování musí být účinným rozkladačem rostlinného nebo živočišného materiálu. Dalším důležitým kritériem je odolnost vůči klimatickým podmínkám (Garg & Yadav 2011).

Pro rychlý, dokonalý a ekonomický průběh je potřeba vybrat správný druh žížal, který rozlišujeme od ostatních podle určitých důležitých znaků. Hodnotí se například podle počtu kokonů, počtu vylíhnutých potomků, rychlosti dospívání, celkové doby vývoje (Zajonc 1992).

3.5.1 Rozdělení žížal do ekologických skupin

Nejméně 4 400 druhů žížal je klasifikováno na základě jejich strategie získávání potravy a chodbičky do tří ekologických skupin: anektické, endogeické a epigeické (Vuković et al. 2021).

První skupina obsahuje žížaly dlouhé až 30 cm. Jejich zbarvení je rudé nebo hnědé. Tato skupina žížal se označuje jako anektické žížaly. Tyto žížaly vytvářejí svislé chodby v půdě, které jsou dlouhé až několik metrů. Jsou to fytofágní druhy (Garg & Yadav 2011). Do chodeb přinášejí potravu, která obsahuje převážně rostlinné zbytky (Zajonc 1992). Potravu sbírají v noci na povrchu půdy (Vuković et al. 2021). Rozmnožují se poměrně rychle a žijí dlouho. Žížaly těchto druhů lze nalézt v malých nebo velkých hloubkách půdy v závislosti na převládajících podmínkách. Anektické druhy hrají velmi důležitou roli při rozkladu a distribuci organické hmoty v půdě. Běžnými anektickými druhy jsou *Lampito Maurittii*, *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea trapezoides* a *Aporrectodea longa* (Garg & Yadav 2011). V ČR je běžný druh *Lumbricus terrestris* (Zajonc 1992).

Druhou skupinu zahrnují žížaly, které jsou zbarvené do šeda až bílé barvy. Žížaly spadají pod skupinu endogeických žížal. Druhy jsou středně velké a dosahují 3 až 15 cm. Nacházejí se v hlinitých vrstvách půdy do 30 cm. Tyto žížaly jsou geofágní (Garg & Yadav 2011). Živí se odumřelými kořínky rostlin, jejich zbytky a dále zpracovávají velké množství zeminy (Zajonc 1992). Endogeické druhy nejsou příliš prospěšné při zapravování hnojiva a rozkladu organického materiálu, protože se živí půdou a rostlinnými zbytky. Hlavní roli hrají v mísení půdy a provzdušňování půdy. Jedná se o hrabavé žížaly, které si budují neustále rozvětvené horizontální chodbičky. Tyto druhy mají střední délku života a jejich reprodukční rychlost je velmi nízká. Běžně endogeické druhy jsou *Octochaetona thurstoni*, *Allolobophora caliginosa*, *Allolobophora rosea* a *Drawida barwelli* (Garg & Yadav 2011). Na našem území se vyskytuje například *Octolasion lacteum* (Zajonc 1992).

Třetí skupinu zahrnují žížaly, které se vyskytují ve vrstvách rostlinných zbytků na povrchu půdy. Tato skupina se nazývá epigeickými žížalami. Ve skupině jsou z většiny rudohnědé druhy žížal, které dosahují délky 3 až 12 cm. Žížaly zpracovávají rostlinný materiál, který se pomalu rozkládá v půdním horizontu (Zajonc 1992). Nemají trvalé chodbičky, ale vytvářejí pomíjivé chodbičky do minerální vrstvy půdy. Žížaly jsou fytofágní. Mají velmi krátkou délku života s rychlým rozmnožováním. Pomáhají při biologickém rozkladu organické hmoty a uvolňují živiny do půdy. Tyto druhy však nejsou vhodné pro využití na zemědělských polích k rekultivaci půdy, protože nedodávají živiny do spodních vrstev půdy (Garg & Yadav 2011).

Epigeické žížaly jsou nejvhodnější pro produkci vermikompostu, protože žijí v organických horizontech. Živí se především rozkládající se organickou hmotou a jsou nejefektivnější při biologickém rozkladu organického odpadu, uvolňování živin do půdy (Przemieniecki et al. 2021). Z padesáti druhů žížal čeledi žížalovití je vhodný k vermikompostování pouze jediný druh, který u nás žije. Jedná se o druh *Eisenia fetida* (Zajonc 1992).

3.5.1.1 Eisenia andrei

Žížala kalifornská neboli *Eisenia andrei* je účelově vyšlechtěná pro vermikompostování organických materiálů. *Eisenia andrei* se vyskytovala původně ve Francii, Itálii a dalších místech střední Evropy (Zajonc 1992). Podobá se žížale hnojní. Žížala kalifornská spotřebuje více materiálu oproti žížale hnojní. V příznivých podmínkách dokáže za den zpracovat organický materiál, který se rovná polovině hmotnosti jednoho jedince (Greenloop 2018). Podle mnoha studií je *Eisenia andrei* žížala, která se začíná rozmnožovat po 21 dnech od svého narození. Jejich reprodukce pokračuje po celý život. Žížaly potřebují pro reprodukci optimální vlhkost a potřebné aerobní podmínky. Ideální vlhkost je kolem 80 %. Páření probíhá v noci a rozmnožování trvá 30–240 minut, kdy vytvářejí kokon. Po 14–21 dnech se vylíhne z jednoho kokonu 4–20 mladých žížal (Amouei et al. 2017). Žížaly kalifornské jsou jednobarevné a jejich zbarvení je tmavo nebo světle rudé. Jedinec váží kolem 0,5 g. Dospělý jedinec měří až 13 cm. Tento druh se dožívá přibližně 4,5 až 5 let (Plíva et al. 2016).



Obrázek č. 3: Žížala kalifornská (<https://www.celostnimediceina.cz/zizala-kalifornska-eisenia-andrei-2.htm>)

3.5.1.2 Eisenia fetida

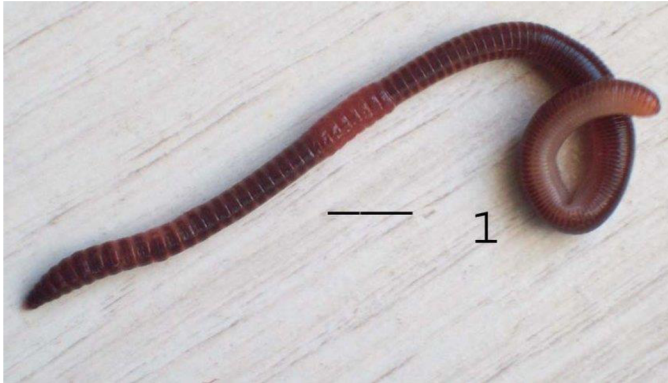
Eisenia fetida se nazývá žížala hnojní. *Eisenia fetida* je nejrozšířenější ze všech žížal pro vermikompostování díky širokému rozmezí tolerance teploty, obsah vlhkosti, pH a akumulace těžkých kovů. Tento druh je zajímavý pro vermikompostování kvůli biologické specializaci. Žížaly hnojní dobře snáší teploty nad 25 °C, které jsou pro ostatní druhy žížal příliš vysoké. Dále se využívají pro vysokou rychlost zpracování kompostovatelného materiálu (Zajonc 1992). Začínají se rozmnožovat tři měsíce po svém narození. Rozmnožují se po celou dobu života. Žížaly potřebují k rozmnožování dostatek vlhkosti a aerobní podmínky (Amouei et al. 2017). Z každého kokonu se vylíhne několik mláďat. Dospělá žížala měří 40 až 120 mm, v průměru těla dosahují 2 až 4 mm a jejich tělesná hmotnost je 0,4 až 1,2 g. Rozdíly mezi *Eisenia fetida* a *Eisenia andrei* jsou nepatrné. Nelze pouhým okem od sebe téměř rozeznat. Dospělé žížaly jsou zbarvené hnědorudě až rudofialově. Na těle mají hnědorudé pruhy uprostřed každého článku. Žížala hnojní je rozšířena téměř po celém světě kromě chladných oblastí (Zajonc 1992).



Obrázek č. 4: Žížala hnojní (<http://www.naturabohe mica.cz/eisenia-fetida/>)

3.5.1.3 *Dendrobaena veneta*

Dendrobaena veneta je velká žížala, která roste velmi rychle. Řada komerčních společností zabývajících se vermikompostováním tento druh používá a může mít zvláštní potenciál pro systémy zlepšování půdy na polích. *Dendrobaena veneta* snese mnohem širší rozsah vlhkosti než mnoho jiných druhů a preferuje mírné teploty 15 °C-25 °C. Životní cyklus může dosáhnout za 100-150 dní a její průměrná doba k pohlavní dospělosti je 65 dní. Průměrná doba inkubace kokonu je 42 dní. Průměrný počet žížal, které se vylíhnou z každého kokonu je asi 1,1 (Edwards et al. 2010).



Obrázek č. 5: *Dendrobaena veneta* (http://www.researchgate.net/figure/Dendrobaena-veneta-Rosa-1886-habitus-male-dorsal-view-scale-line-05-cm_fig1_320991629)

3.5.1.4 *Dendrodrilus rubidus*

Dendrodrilus rubidus je žížala z čeledi Lumbricidae s poměrně kosmopolitním rozšířením. Je to epigeická žížala s jasnou předností pro vysoce organické půdy. Byla také nalezena v organických substrátech. Jedná se o hnojící dřevo a slámu, borovou podestýlku, kompost, rašelinu. Průměrná doba pohlavní dospělosti u *Dendrodrilus rubidus* je 51 dní. Úspěšnost vylíhnutí kokonů je 85 %, inkubační doba je 22 dní a průměrná úspěšnost vylíhnutých mláďat je 1,7. *Dendrodrilus rubidus* má délku životního cyklu kolem 75 dnů (Edwards et al. 2010).



Obrázek č. 6: *Dendrodrilus rubidus* (https://www.lepidoptera.no/en/arter/?or_id=4001)

3.5.1.5 *Lumbricus rubellus*

Lumbricus rubellus se obvykle vyskytuje ve vlhkých půdách, na které byl aplikován zvířecí hnůj nebo odpadní vody. Existuje jen málo údajů o jejich preferencích na vlhkost a teplotu. Ačkoli je známo, že jednoznačně preferuje vlhké podmínky a dokáže dobře zvládat nízké teploty. Optimální teplota pro vývoj žížal je 18 °C. Po inkubační době 35-40 dnů se z každého kokonu narodí jedna žížala. Nízká rychlost dospívání a reprodukce naznačuje, že není ideální pro použití ve vermikompostování. Velikost a síla žížal může sloužit pro účely jako rybí návnady nebo pro zlepšení půdy (Edwards et al. 2010).

3.5.1.6 *Perionyx excavatus*

Perionyx excavatus je epigeický druh žížaly, který se běžně vyskytuje v oblastech jižní Asie. Byly dovezeny do Evropy a Severní Ameriky. Žije výhradně v organických odpadech a dokáže přeměnit materiály na hodnotný vermikompost. Hotový produkt lze použít jako médium pro pěstování rostlin (Sonowal et al. 2013). Tato tropická žížala je extrémně plodná a manipulace s ní je velice snadná. Životní cyklus *P. excavatus* trvá 40-50 dní (Edwards et al. 2010). Mláďata dospívají už 28 den od narození (Zajonc 1992). Z každého kokonu se obvykle vylíhne pouze jedno mládě (Edwards et al. 2010). Váží kolem 0,8 gramů (Zajonc 1992). Hlavní nevýhodou je neschopnost odolávat nízkým teplotám, ale v tropických podmínkách je ideální druh pro vermikompostování. Dokonce ani v tropických oblastech *P. excavatus* neroste během nízkých teplot, ale může přežít vysoké letní teploty. Používá se ve vermikultuře v Indii, na Filipínách a v Austrálii. Životní cyklus a potenciál tohoto druhu pro rozklad organických odpadů byl dokumentován různými autory za kontrolovaných podmínek (Edwards et al. 2010).

3.5.1.7 *Eudrilus eugeniae*

Eudrilus eugeniae se využívá ve vermikompostování v Americe, ale pochází ze západní Afriky. Do Spojených států byl dopraven a chován jako návnada pro rybářské odvětví, kde byl nazýván "africký noční prolézač". Žížala roste velice rychle a má vysokou rychlost reprodukce. Rychle rozkládá organické odpady a začleňuje do ornice (Edwards et al. 2010). Preferuje klimaticky teplé prostředí při teplotách 24 až 29 °C. V teplotách 10 °C dochází k úmrtí žížaly (Zajonc 1992). Snese vlhkost v rozmezí 70 % až 85 %, ale optimální podmínky vlhkosti jsou mezi 80 % - 82 %. Životní cyklus *E. eugeniae* se pohybuje od 50 do 70 dnů a může se dožít až 1-3 roku. Pohlavní dospělosti dosahuje během 40-49 dnů a týden po dovršení pohlavní dospělosti začínají vytvářet kokony. Inkubační doba kokonů se pohybuje od 12 do 16 dnů a úspěšnost vylíhnutí je od 75 % do 84 %, přičemž průměrný počet vylíhnutých žížal z kokonu činí mezi 2 a 2,7 (Edwards et al. 2010).

3.6 Vermikompostování čistírenských kalů

Kaly z čistíren odpadních vod musí být řádně odstraněny v případě, že může docházet k ohrožení ovzduší, půdy a vody. Existuje celá řada metod likvidace kalů z čistíren odpadních vod (Yilmaz & Agdag 2020). Trvale udržitelným přístupem tohoto problému bude jeho přeměna na užitečný recyklovatelný výrobek ekologickou a ekonomickou metodou (Khwairakpam & Bhargava 2009).

Vermikompostování se jeví jako vhodný způsob nakládání s čistírenskými kaly (Amouie et al. 2017). Metoda je snadno proveditelná a lze jí realizovat v uzavřeném prostoru za účelem výroby kvalitního produktu (hnojiva). Žížaly byly úspěšně použity při vermikompostování městských, průmyslových, zemědělských odpadů za účelem výroby organických hnojiv a

získávání bílkovin pro krmiva (Khwairakpam & Bhargava 2009). Vermikompostování čistírenských kalů se široce používá k imobilizaci těžkých kovů (Dusa et al. 2020).

Výzkum potenciálního využití žížal k odstraňování a úpravě čistírenského kalu začal na konci 70. let minulého století. Používání žížal v kalovém hospodářství bylo nazváno vermikompostováním nebo vermistabilizací. Poměrně brzy bylo v laboratorním měřítku prokázáno, že žížaly mohou přijímat aerobní kal z čistíren odpadních vod. Čistírenský kal zpracovaný pomocí žížal je rozložený třikrát rychleji než normálním kompostováním, kvůli nárůstu mikroorganismů ve vermikompostu. Během procesu zmizí pachy z kalu a dochází ke snížení populací patogenních mikroorganismů. Jedná se o patogenní organismy *Salmonella enteritidis*, *Escherichia coli* a další Enterobacteriaceae (Domínguez et al. 2000).

Použití vermikompostování při stabilizaci kalu ve Spojených státech amerických vedlo ke 100 % eliminaci patogenů (Amouei et al. 2017).

Míchání čistírenského kalu s jinými odpady může urychlit rozklad surovin v důsledku macerace a lepší konzumaci odpadu žížalami, zvolením vhodné skladby materiálů (Domínguez et al. 2000).

Přeměna průmyslových a městských kalů na vermikompost je velmi důležitá. Na jedné straně se odpad přeměňuje na kvalitní produkt a na druhé straně se redukuje znečišťující látky vznikající v důsledku rostoucí industrializace nebo nesprávného zacházení s toxickými materiály (Liu et al. 2012).

3.7 Vermikompostování odpadního papíru

Mnohá odvětví produkují velké objemy odpadového papíru, který často spalují a přispívají k tvorbě skleníkových plynů v atmosféře. Zejména se jedná o CO₂. Kromě toho takový způsob znamená plýtvání organickým uhlíkem, který by mohl být lépe využit (GajaJakshmi et al. 2002).

Papír a odpady na bázi papíru jsou bohaté na celulózu (uhlík) a chudé na obsah dusíku. Mají mnohem vyšší poměr C:N než čistírenské kaly. Skartovaný papír má nízkou objemovou hustotu, což umožňuje dostatečné provzdušňování, ale vodou nasáklý materiál je příliš hustý a neumožňuje volné provzdušňování. Aerobní bakterie nejsou schopny využít komplexní celulózu papírového odpadu (Basheer & Agrawal 2016).

Kvůli velkému obsahu celulózy je vermikompostování odpadního papíru vhodné pro žížaly. V trávicím ústrojí žížal se nachází vysoké množství celulótického enzymu, kterým žížaly snadno rozkládají papírový materiál ve střevech. Papír zlepšuje strukturu a vyrovnává vlhkost odpadu. Nevýhoda krmení odpadním papírem je nedostatečný obsah živin. Podávání pouze papírového materiálu žížalám během procesu vermikompostování způsobuje pokles hmotnosti jedinců (Hanč & Plíva 2013).

Edwards et al. (2010) použili sběrový papír ve vermikompostování jako první. Uvědomili si, že sběrový papír je třeba smíchat s jinými odpady, aby se dosáhlo správného poměru C:N a před vermikompostováním je nezbytné předkompostování za pomoci mikroorganismů (Basheer & Agrawal 2016).

Nerecyklovatelný papírový odpad může být dobrým krmivem pro žížaly v procesu vermikompostování díky své netoxické a biologicky rozložitelné povaze. Transformace nerecyklovatelného papírového odpadu na vermikompost má dvojitý význam: na jedné straně je odpad přeměněn na jednodušší látky a na druhé straně redukuje množství odpadního papíru, který je důsledkem hospodářského rozvoje (Gupta & Garg 2009).

Vermikompostování papírového odpadu proto není snadným úkolem. Musí se určit vhodná kombinace a poměr surovin pro vermikompostování (Basheer & Agrawal 2016). Nejvhodnější kombinace s odpadním papírem je materiál nebo odpad s vyšším obsahem živin. Vhodný materiál může být čistírenský kal, který má vysoký obsah živin. O vermikompostování odpadního papíru je poměrně méně informací než o jiných organických odpadech (Hanč & Plíva 2013).

4 Metodika

4.1.1 Materiál

Vstupní suroviny do pokusu obsahovaly dva čistírenské kaly a nasávanou kartonáž (proložky vajec). Kal č. 1 pocházel z čistírny odpadních vod, která měla objemové zatížení nad 100 tisíc ekvivalentních obyvatel a druhý čistírenský kal byl dovezen z ČOV, která měla kapacitu mezi 10 tisíc až 100 tisíc ekvivalentních obyvatel. Tyto vstupní suroviny byly namíchaný v poměru 6 tun čistírenských kalů a 2,5 tuny nadrcených proložek. Konečný poměr surovin byl upraven na hodnoty C:N 25:1. Směsi byly rozděleny na dvě hromady s jednotlivými druhy kalů. Do směsi byla přidána voda o objemu 4,2 m³.

Kartonáž byla nadrcena pomocí rychloběžného drtiče Willibald 5500. Z těchto vstupních materiálů byly vytvořeny dvě směsi pro výzkum.



Obrázek č. 7: Vstupní materiály pro výzkum (foto Milan Hrčka)

4.1.2 Průběh pokusu

Poloprovozní pokus probíhal v Recyklačním centru v Kutné Hoře provozované společností ZERS spol. s r.o. Pokus byl založen na předkompostování smíchaného materiálu. Předkompostováním docházelo ke snižování obsahu amoniaku v čistírenských kálech, aby byla výsledná směs vhodná pro přežití žížalí populace. Pro předkompostování byly postaveny v kryté hale betonové kóje, kam byly uloženy kaly a nasávaná kartonáž. Směs čistírenských kalů a nasávané kartonáže byla namíchána 22.3.2021. Předkompostování probíhalo jeden měsíc v krytém objektu od 30.3. Překopávky směsi probíhaly v termínech 6.4., 13.4., 20.4., 27.4., pomocí čelního nakladače. Před překopávkou byla měřena teplota, která se pohybovala v rozmezí od 25 do 40 °C. Dále byla upravována vlhkost jednotlivých směsí na hodnotu 80 % zkrápěním vodou. Na obrázku č.8 je znázorněno předkompostování směsí. Vpravo je směs kalu 1 a kartonáže, vlevo je směs kalu 2 a nasávané kartonáže.



Obrázek č. 8: Předkompostování dvou směsí (foto Milan Hrčka)

Celkem byly vytvořeny čtyři pásové zakládky. Dvě zakládky byly s žížalí populací a dvě bez žížal jako kontrolní zakládky. Dále byly postaveny čtyři betonové kóje pro dva slepé vzorky a dva vermikompostovací pokusy. Základní vrstva ze směsi měla parametry 5 m x 1 m x 0,15 m. Vedle základní vrstvy jsme připravili substrát s žížalami. Substrát měl objem 1,5 m³ a hustota byla 100ž/1 litr. Každá zakládka obsahovala přibližně 7500 ks žížal.

V kontrolních zakládkách probíhal stejný proces pouze bez žížal. Proces vermikompostování začal 28. 4. 2021. Pro výzkum byl vybrán druh žížal *Esenia andrei*. Vermikompostování probíhalo na metodě průběžného krmení pro žížaly. Jednalo se o přidávání vrstev krmného materiálu pro žížaly. Celkem bylo šest vrstev v pokusných zakládkách. Každá vrstva směsi měla tloušťku cca 15 cm. Před každým krmením se upravovala vlhkost směsi na přibližně 70-80 % (hodnocení pěstní zkouškou). Termíny přidání vrstev probíhaly 1.6., 30.6., 31.7., 1.9., 1.10. Níže na obrázku můžeme vidět dvě vermikompostovací zakládky. Vlevo je vermikompostovací zakládka s kalem č. 1 a vpravo se nachází zakládka s kalem č. 2.



Obrázek č. 9: Vermikompostovací zakládky v betonových kójích (foto Milan Hrčka)

Tabulka č. 1: Stáří vrstev v pokusu

Vrstva	Termín přidání vrstvy	Stáří vrstvy	Tloušťka vrstvy
VI	1.10.	39 dnů	15 cm
V	1.9.	69 dnů	15 cm
IV	31.7.	101 dnů	15 cm
III	30.6.	132 dnů	15 cm
II	1.6.	161 dnů	15 cm
I	28.4.	195 dnů	15 cm

V tabulce č. 1 můžeme vidět stáří vrstev a tloušťku přidaných vrstev. Počet dnů se počítal od odběru vzorků až po založení pokusu. Nejstarší vrstva byla stará 195 dnů a nejmladší měla 39 dnů. Každá vrstva měla tloušťku 15 cm.

4.1.3 Odběry vzorků a počítání žížal

Po ukončení procesu vermikompostování v pásových zakládkách byly odebrány tři vzorky z každé vrstvy. Odběr vzorků probíhal v termínu 9. 11. 2021. Pro určení počtu žížal jsme odebírali vzorky s hmotností 500 g. Z každé vrstvy jsme dále odebrali 30 g vzorků do sáčku pro stanovení pH a měrné vodivosti. Do větších nádobek jsme odebírali 150 g vzorků pro metodu lyofilizace, která zahrnuje stanovení sušiny, celkových a přístupných obsahů prvků.

Každý vzorek jsme vysypali pro určení počtu žížal a pinzetou jsme odebírali žížaly do prázdné misky. Zapsali jsme do tabulek počet žížal v každém vzorku a dali jsme žížaly na analytickou váhu. Před odběrem byly zváženy prázdné misky a poté naváženy s odpovídajícím počtem žížal pro vzorek na určení hmotnosti v dané vrstvě. Na obrázku č. 10 je vidět odběr vzorků z vermikompostovací zakládky.



Obrázek č. 10: Odběr vzorků z vermikompostovací zakládky (foto Milan Hrčka)

4.2 Agrochemické analýzy

4.2.1 Stanovení pH

Hodnota pH byla stanovena z čerstvě odebraných vzorků v hmotnostním poměru 1:5 (vzorek : voda). Nejprve se navážilo 8 g čerstvého materiálu, dále se přidalo 40 ml demineralizované vody. Nádobky byly umístěny do laboratorní třepačky a protřepány po dobu 10 minut. Poté probíhalo stanovení pH ze vzorků pomocí přístroje WTW pH 340i.

4.2.2 Měrná vodivost

Stanovení měrné vodivosti probíhalo ve stejném poměru 1:5 jako u stanovení pH. Navážilo se 8 g čerstvého materiálu a přidalo 40 ml demineralizované vody. Vzorky byly vloženy do laboratorní třepačky na 10 minut. Následně byly vzorky dány do centrifugy na 10 minut při frekvenci 6000 otáček za minutu. Nakonec byly vzorky filtrovány a vodivost stanovena pomocí konduktometru WTW cond 730.

4.2.3 Stanovení uhlíku a dusíku

Nejdříve se zvažila cínová fólie a poté byl přidán vzorek. Navážilo se kolem 20 mg namletého suchého vzorku na analytické váze. U každého vzorku byla zaznamenána hmotnost materiálu pro přesnější hodnocení. Vzorky byly zabaleny a stlačeny, aby bylo dosaženo kvalitního měření hodnot v materiálu. Celkové obsahy uhlíku a dusíku byly stanoveny pomocí Elementárního analyzátoru CHNS vario MACRO cube.

4.2.4 Stanovení celkového obsahu makroprvků

Nejdříve bylo naváženo kolem 0,40 g vzorku na analytické váze. Pokaždé jsme navážili devět vzorků a desátý vzorek byl slepý pokus pro srovnání. Do odměrného válce bylo pipetováno 70 ml kyseliny chlorovodíkové a bylo přidáno 30 ml kyseliny dusičné. V odměrném válci vznikla lučavka královská, která byla přidávána do každé nádoby po 10 ml. Nádoby na mikrovlnný rozklad byly utěsněny těsnícím kroužkem a dotaženy kleštěmi. Následně byly poskládány do mikrovlnné trouby na hodinu o teplotě 231 °C. Po hodině se vzorky nechaly vychladnout pro další postup. Vychladnuté vzorky byly nality do teflonových kádinek a umístěny na odpařovací pec. Odpařování vzorků probíhalo po dobu jedné hodiny za teploty 161 °C. Vzorky se odpařovaly přibližně na 2 ml. Po odpařování byly vzorky přeneseny do zkumavek s obsahem 25 ml. Zkumavky byly doplněny do 25 ml demineralizovanou vodou a uzavřeny parafínem. Pro určení celkových obsahů makroprvků byla zvolena metoda ICP-OES.

4.2.5 Stanovení obsahu přístupných makroprvků

Přístupné obsahy makroprvků byly určeny za pomoci výluhu v CAT. Jedná se o sloučeninu, kterou obsahuje roztok chloridu vápenatého a kyseliny etylendiamintetraoctová. Poměr výluhu činil 1:10.

Navážka suchého namletého vzorku byla 4 g, poté byla doplněna 40 ml zředěného roztoku CAT do vzorku. Ředění bylo v poměru 1:9. Vzorky byly umístěny na třepačku a třepány po dobu jedné hodiny. Z třepačky byly přesunuty na centrifugování, které probíhalo 10 minut při 6000 ot./min. Pro určení přístupných obsahů makroprvků byla vybrána metoda optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem ve zkratce ICP-OES.

4.3 Statistické analýzy

Data byla zpracována v programu MS Excel 365, která byla zanesena do tabulek a následně byly vyhodnoceny průměry a směrodatné odchylky. Statistické analýzy byly provedeny v programu Statistica 12. Nejdříve byl proveden test homogenity rozptylů a normality dat pomocí Shapiro – Wilkova testu. Nebyly splněny předpoklady, proto byl použit Kruskal – Wallisův test pro neparametrické testy, který zpracovává pořadové hodnoty.

5 Výsledky

5.1 Vstupní suroviny

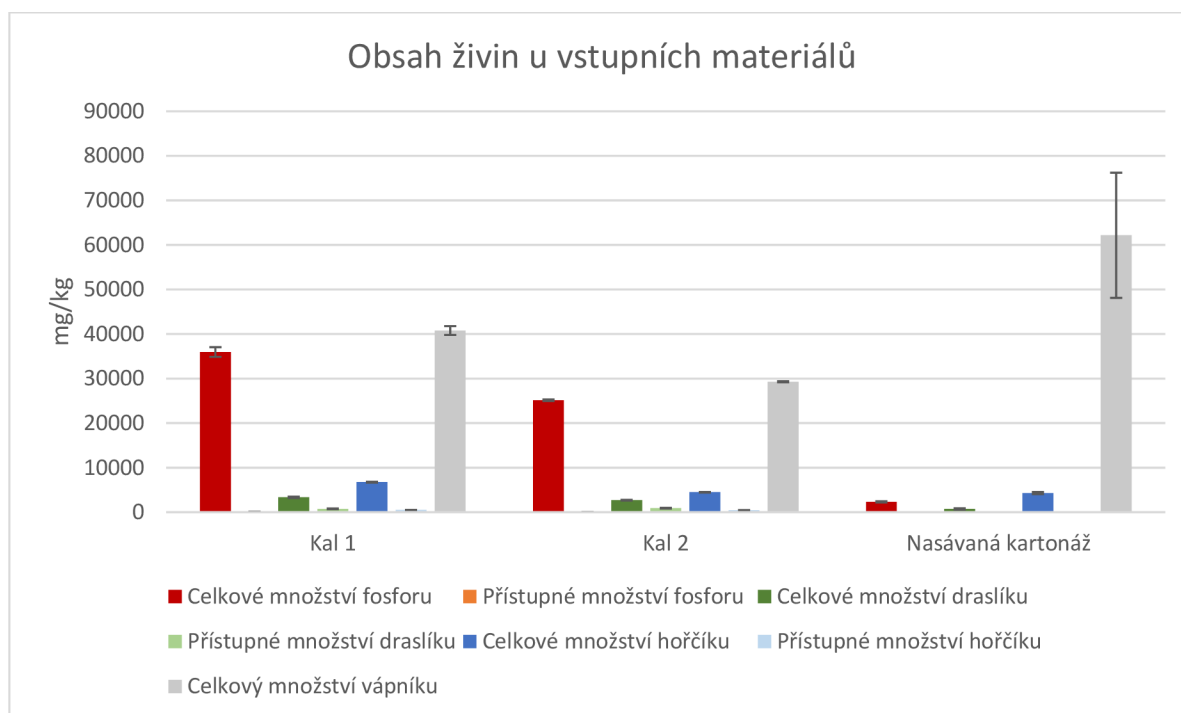
Tabulka č. 2: Fyzikálně-chemické parametry vstupních surovin

Materiál	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C:N
Čistírenský kal 1	26,4 \pm 0,03	73,6 \pm 0,03	8,65 \pm 0,05	1159 \pm 19,30	7,6 \pm 0,05
Čistírenský kal 2	23 \pm 0,16	77 \pm 0,16	8,34 \pm 0,05	962 \pm 17,63	7 \pm 0,05
Nasávaná kartonáž	88 \pm 1,03	12 \pm 1,03	7,43 \pm 0,02	844 \pm 12,23	128 \pm 13,05

Hodnoty jsou průměry, \pm směrodatná odchylka (n=3).

U směsí dvou čistírenských kalů nebyly hodnoty sušiny tolik rozdílné. U čistírenského kalu č. 1 byl obsah sušiny 26,4 %. Čistírenský kal č. 2 měl obsah sušiny 23 %. Velký rozdíl měla nasávaná kartonáž, kde byl obsah sušiny vyšší téměř 4 x než u čistírenských kalů. V čistírenských kálech se nacházela vysoká vlhkost. Nasávaná kartonáž měla vlhkost přibližně 6 x menší než čistírenské kaly. Z výsledků v tabulce lze vyvodit, že hodnoty pH u čistírenských kalů se významně nelišily. U prvního kalu bylo pH 8,65 a u druhého kalu bylo 8,34. Nasávaná kartonáž měla hodnotu pH o 0,91 až 1,22 kyselejší než čistírenské kaly. Elektrická vodivost byla vyšší u obou druhů čistírenských kalů oproti nasávané kartonáži. Čistírenské kaly měly hodnoty měrné vodivosti v rozmezí od 962 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do 1159 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nasávaná kartonáž měla vodivost 844 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nejvyšší měrnou vodivost měl kal č. 1, jehož hodnota byla 1159 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Největší rozdíl byl mezi hodnotami v poměru C:N. Nasávaná kartonáž měla hodnotu C:N 16 x vyšší než čistírenské kaly.

Graf č. 2: Obsah živin u vstupních materiálů



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3).

V grafu jsou znázorněny některé makroprvky vstupních surovin. Nejvyšší zastoupení prvků ze surovin má celkový vápník. Druhý nejvyšší podíl má celkový fosfor, třetí je celkový hořčík a čtvrtý celkový draslík. Zmíněné nejvyšší podíly měl čistírenský kal. U nasávané kartonáže nebyly stanoveny přístupné obsahy, protože vzorky nebyly vhodné pro zjištění hodnot. Kal č. 1 měl nejvyšší hodnoty živin kromě celkového množství vápníku. U kalu č. 2 byly zjištěny druhé nejvyšší hodnoty makroprvků. Nejmenší hodnoty celkových prvků P, K, Mg měla nasávaná kartonáž.

U kalu č. 1 bylo celkové množství fosforu 35958 mg/kg, z něhož tvořil přístupný fosfor pouze 0,3 %. Druhý kal měl hodnotu celkového fosforu 25140 mg/kg a přístupné množství fosforu bylo 0,2 %. Nasávaná kartonáž měla množství celkového fosforu jen 2321 mg/kg.

V prvním kalu byl celkový draslík 3345mg/kg, z toho bylo zaznamenáno přístupné množství 22 %. Druhý kal obsahoval celkové množství draslíku 2702 mg/kg, z toho tvořil přístupný obsah 33 %. Nasávaná kartonáž měla hodnotu celkového draslíku pouze 722 mg/kg.

První kal měl celkový hořčík 6757 mg/kg a přístupný obsah hořčíku byl 66 % z celkového množství. U druhého kalu byl obsah celkového hořčíku 4488 mg/kg, z toho bylo přístupné množství jen 10 %. Nasávaná kartonáž měla hodnotu celkového hořčíku 4296 mg/kg.

5.2 Namíchané směsi

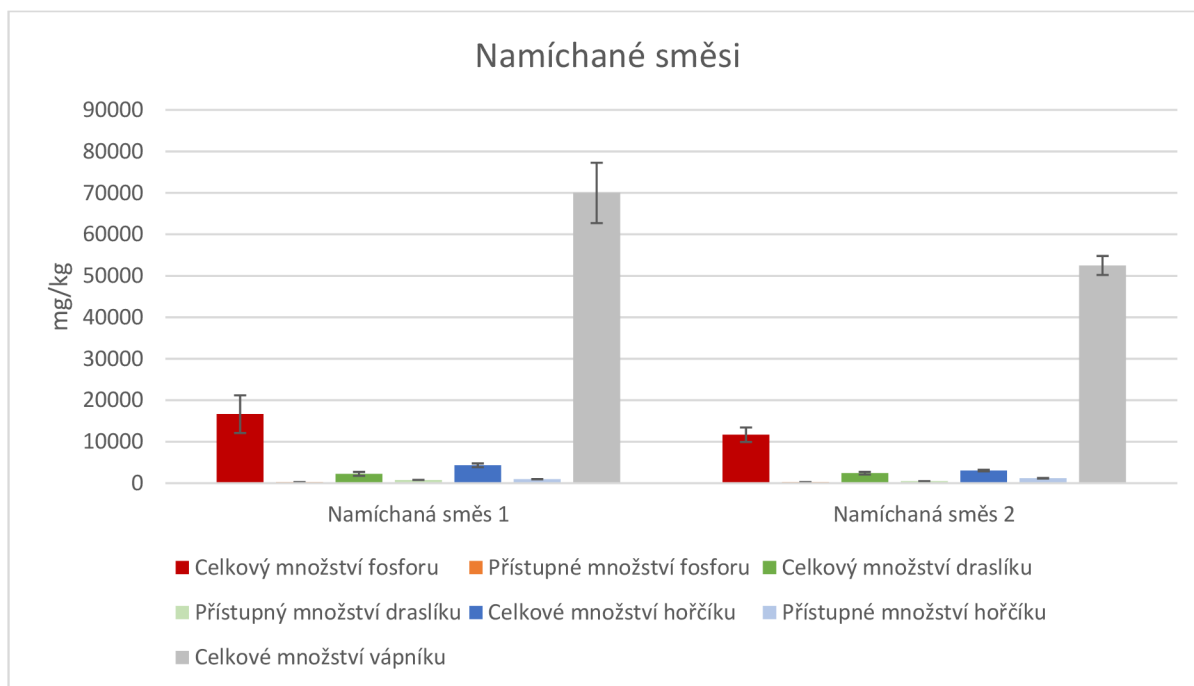
Tabulka č. 3: Fyzikálně-chemické parametry namíchaných směsí

Materiál	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C:N
Směs 1	26,2	73,8	7,43 \pm 0,03	1179 \pm 64,32	17,1 \pm 3,87
Směs 2	25,8	74,2	7,50 \pm 0,01	1021 \pm 32,26	13,2 \pm 0,85

Hodnoty jsou průměry, \pm směrodatná odchylka (n=3).

Po smíchání dvou čistírenských kalů a nasávané kartonáže vznikly dvě směsi pro pokus. Směs s kalem č. 1 obsahovala 26,2 % sušiny. Směs s kalem č. 2 měla 25,8 % sušiny, tudíž hodnoty sušiny byly podobné. Směs č. 2 měla vyšší obsah vlhkosti o 0,40 % než první směs. U obou směsí neměly hodnoty pH výraznou odchylku. Elektrickou vodivost měla směs s prvním kalem 1179 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Druhá směs měla nižší elektrickou vodivost o 158 $\mu\text{S}/\text{cm}$ než první směs. U poměru C:N byl velký rozptyl v datech. Směs s čistírenským kalem 1 měla poměr 17,1 a druhá směs obsahovala pouze 13,2. Rozdíl mezi hodnotami C:N byl 3,9.

Graf č. 3: Zastoupení celkových a přístupných obsahů ve směsích



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3).

V namíchaných směsích bylo největší zastoupení celkového množství vápníku. První směs měla celkové množství vápníku 69991 mg/kg a druhá směs měla 52499 mg/kg.

Celkový fosfor byl druhý nejpočetnější prvek. U první směsi byl 16639 mg/kg a u druhé směsi byl 11679 mg/kg. Přístupné množství fosforu bylo velmi malé oproti celkovému obsahu. V první směsi bylo naměřeno pouze 1,4 % z celkového množství a druhá směs měla přístupné množství 2 %.

U obou směsí byl nalezen jako třetí nejvyšší prvek celkový hořčík. V první směsi bylo stanoveno množství 4303 mg/kg, z toho tvořilo přístupné množství 22 %. Druhá směs měla obsah 3047 mg/kg. U směsi č. 2. byl přístupný hořčík vyšší než v první směsi. Přístupné množství bylo 39 % z celkového množství.

Celkové množství draslíku bylo nalezeno v malém množství. Druhá směs měla množství draslíku 2414 mg/kg a první směs měla nižší množství o 177 mg/kg než druhá. V poslední řadě byl přístupný draslík. U první směsi bylo přístupné množství 35 %. Druhá směs měla obsah přístupného draslíku 20 % z celkového množství.

5.3 Kontrolní zakládka se směsí č. 1

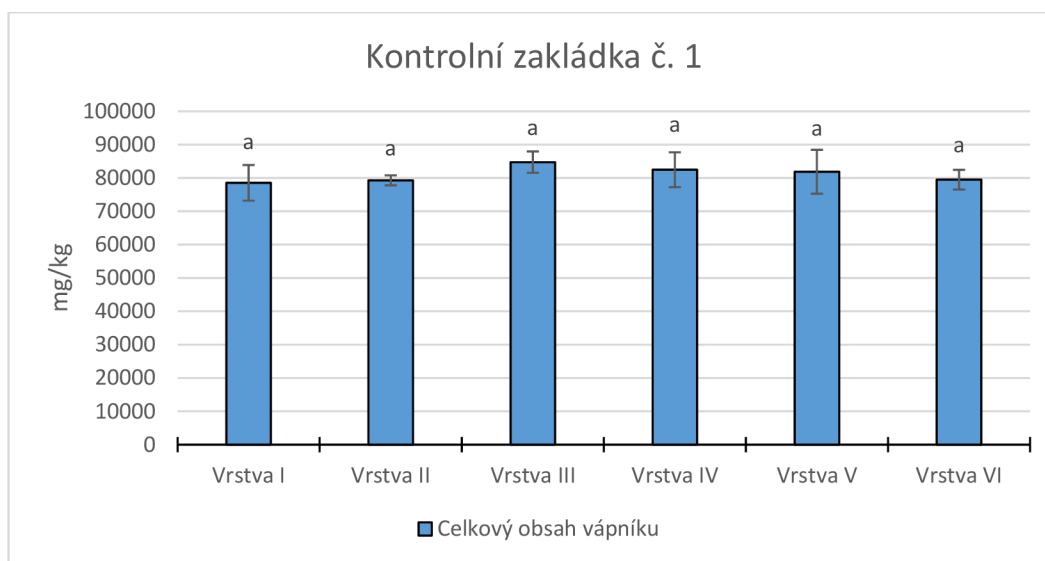
Tabulka č. 4: Fyzikálně-chemické parametry kontrolní zakládky č. 1

Vrstva	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C:N
VI	32,2 \pm 0,37 ^b	67,8 \pm 0,37 ^b	7,16 \pm 0,05 ^a	1444 \pm 100,45 ^a	14,1 \pm 0,26 ^b
V	33,9 \pm 0,62 ^{ab}	66,1 \pm 0,62 ^{ab}	7,19 \pm 0,02 ^a	1504 \pm 152,78 ^a	13,5 \pm 0,55 ^{ab}
IV	34,3 \pm 0,08 ^{ab}	65,7 \pm 0,08 ^{ab}	7,20 \pm 0 ^a	1361 \pm 23,27 ^a	13,6 \pm 0,27 ^{ab}
III	34,9 \pm 0,51 ^{ab}	65,1 \pm 0,51 ^{ab}	7,42 \pm 0,11 ^a	1048 \pm 115,44 ^a	13,8 \pm 0,23 ^{ab}
II	35,3 \pm 0,64 ^{ab}	64,7 \pm 0,64 ^{ab}	7,48 \pm 0,07 ^a	895 \pm 69,23 ^a	14,1 \pm 0,11 ^{ab}
I	35,8 \pm 0,50 ^a	64,2 \pm 0,50 ^a	7,45 \pm 0,02 ^a	804 \pm 53,72 ^a	16,2 \pm 1,25 ^a

Hodnoty jsou průměry, \pm směrodatná odchylka (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

V kontrolní zakládce byl obsah sušiny rostoucí od nejmladší (VI) po nejstarší (I) vrstvu. Průměrný obsah sušiny se pohyboval kolem 34 %. Statisticky významný rozdíl byl mezi první a šestou vrstvou v obsahu sušiny. Vlhkost byla v rozmezí 64–68 % u první kontrolní zakládky. Nejvyšší vlhkost měla šestá vrstva a nejmenší obsah vlhkosti byl zaznamenán u vrstvy první. Obsah vlhkosti klesal od nejmladší vrstvy do nejstarší. Obsah sušiny byl statisticky významný rozdíl mezi první a šestou vrstvou. Kontrolní zakládka měla průměrné pH okolo 7,3. Hodnota pH se zvyšovala od šesté do druhé vrstvy. V šesté vrstvě bylo pH nižší o 0,31 oproti vrstvě první. Hodnoty pH neměly žádný statisticky významný rozdíl. Elektrická vodivost se zvýšila ve vrstvě šest a pět, poté se sestupně snižovala do první vrstvy. Elektrická vodivost byla nejvyšší ve vrstvě pět a měla hodnotu 1504 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Elektrická vodivost byla skoro 2 x vyšší v páté vrstvě než první vrstvě. U elektrické vodivosti nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. Průměrný poměr C:N se pohyboval kolem 14,2. V šesté vrstvě byla hodnota 14,1. V první vrstvě byla hodnota C:N vyšší o 2,1 než ve vrstvě šesté. Statisticky významný rozdíl byl vyhodnocen mezi první a šestou vrstvou.

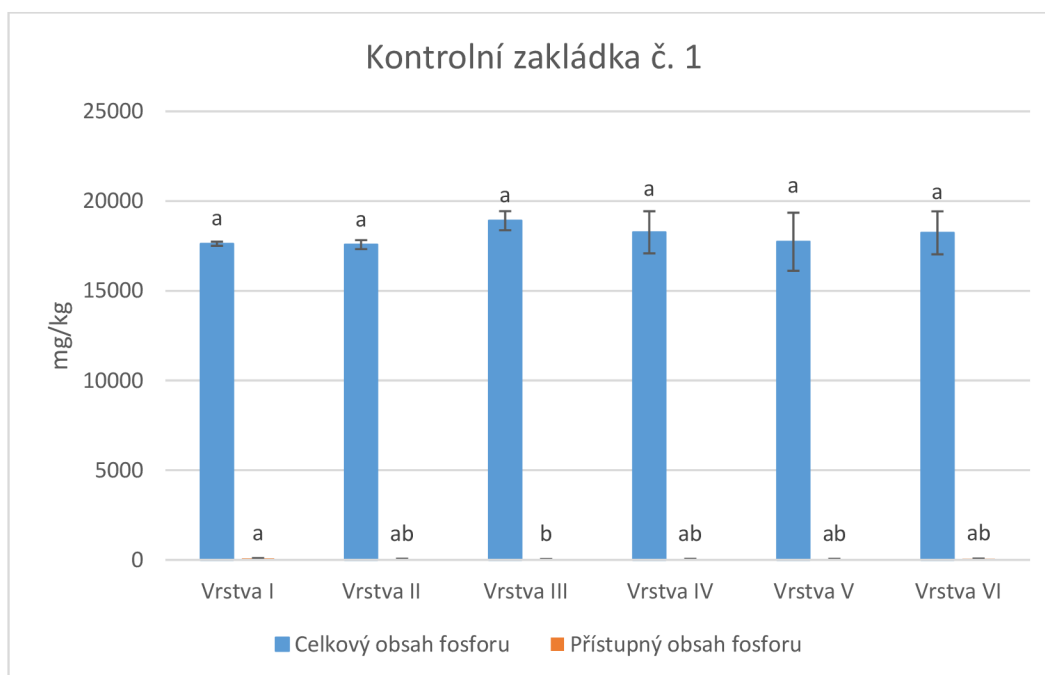
Graf č. 4: Celkový obsah vápníku v kontrolní zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Celkový obsah vápníku se moc nelišil v kontrolní zakládce č. 1. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 78529 mg/kg do 84749 mg/kg. Nejmenší obsah vápníku byl nalezen v první vrstvě a největší množství bylo ve třetí vrstvě. Jednotlivé vrstvy se od sebe statisticky významně nelišily, proto jsou všude stejné indexy nad vrstvami v grafu.

Graf č. 5: Obsah celkového a přístupného fosforu v kontrolní zakládce č. 1

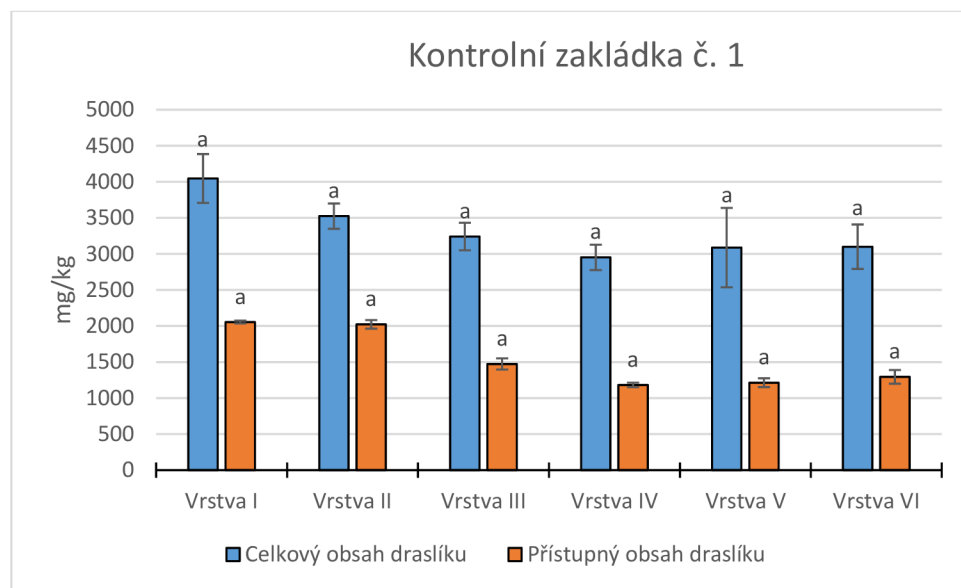


Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

U celkového obsahu fosforu můžeme říct, že největší obsah byl naměřen ve třetí vrstvě (18907 mg/kg), z toho přístupné množství bylo pouze 0,2 %. Nejmenší množství celkového fosforu bylo 17573 mg/kg a přístupný fosfor byl pouhých 0,3 %. Ve statistickém šetření nebyl zjištěn žádný statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupný obsah fosforu

měl velmi malé hodnoty. Nejspíš se stala chyba v měřicím zařízení při stanovování obsahu. Hodnoty se pohybovaly od 47 mg/kg do 88 mg/kg. Statisticky významný rozdíl byl zjištěn právě u první a třetí vrstvy.

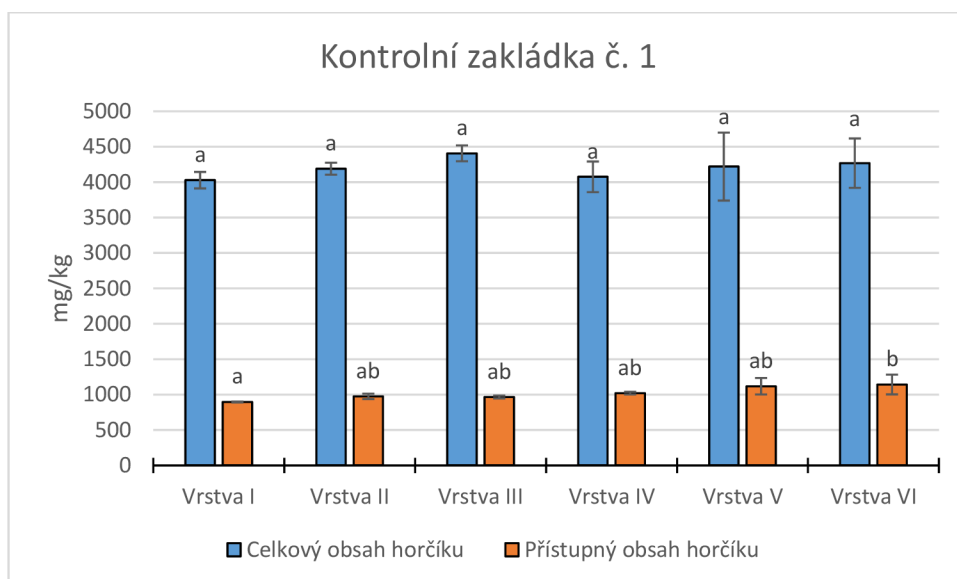
Graf č. 6: Celkový a přístupný obsah draslíku v kontrolní zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu ($P < 0,05$).

Na grafu č. 6 je znázorněn celkový obsah a přístupný obsah draslíku v jednotlivých vrstvách. Celkový obsah draslíku klesal od první vrstvy do čtvrté a mírně se zvýšil od čtvrté vrstvy do šesté. Nejvyšší množství celkového obsahu draslíku bylo 4040 mg/kg, z toho tvořilo přístupné množství 51 %. Nejmenší celkové množství bylo 2946 mg/kg a přístupný obsah byl 40 %. Nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupný obsah draslíku klesal od první vrstvy do čtvrté, stejně jako u celkového obsahu. Množství celkového draslíku se zvyšovalo od čtvrté do šesté vrstvy. U přístupného obsahu draslíku byly hodnoty v rozmezí od 1182 mg/kg do 2054 mg/kg. Mezi jednotlivými vrstvami nebyl nalezen žádný statisticky významný rozdíl.

Graf č. 7: Obsah celkového a přístupného hořčíku v kontrolní zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

V grafu č. 7 jsou vyhodnoceny hodnoty celkového a přístupného hořčíku z kontrolní zakládky č. 1. Celkové obsahy hořčíku se pohybovaly nad 4000 mg/kg. Největší směrodatná odchylka byla spočítána v páté vrstvě. Nejvyšší množství celkového hořčíku bylo 4406 mg/kg, z toho obsahoval přístupný hořčík 22 %. Nejnižší množství celkového hořčíku bylo 4027 mg/kg, z toho obsahovalo přístupné množství 22 %. U celkového obsahu hořčíku nebyl stanoven statisticky významný rozdíl ve vrstvách. Hodnoty přístupného množství hořčíku se od sebe výrazně nelišily. Přístupný obsah hořčíku byl vyhodnocen od 895 mg/kg do 1142 mg/kg. Statisticky významný rozdíl byl určen mezi první a šestou vrstvou kontrolní zakládky.

5.4 Kontrolní zakládka se směsí č. 2

Tabulka č. 5: Fyzikálně-chemické parametry kontrolní zakládky č. 2

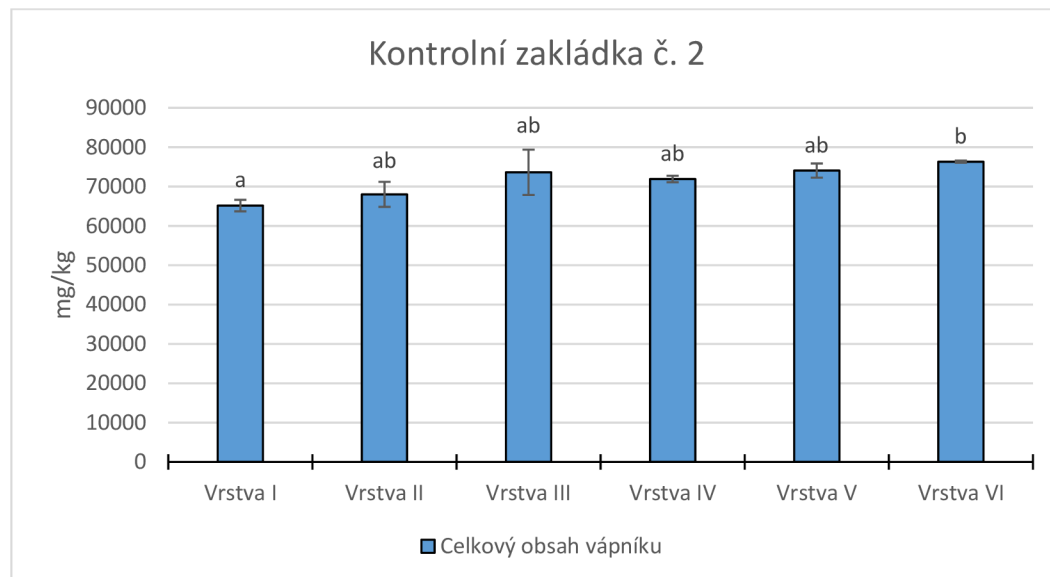
Vrstva	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC (μS/cm)	C:N
VI	32,9±0,59 ^b	67,1±0,59 ^b	7,29±0,04 ^a	1535±105,46 ^{ab}	13,6±0,43 ^a
V	34,6±0,57 ^{ab}	65,4±0,57 ^{ab}	7,28±0,03 ^a	1635±139,65 ^{ab}	13,3±0,24 ^a
IV	35,2±0,24 ^{ab}	64,8±0,24 ^{ab}	7,24±0,04 ^a	1739±165,89 ^b	12,2±0,45 ^a
III	35,7±0,45 ^{ab}	64,3±0,45 ^{ab}	7,48±0,05 ^a	1194±28,57 ^{ab}	12,7±0,21 ^a
II	35,9±0,57 ^{ab}	64,1±0,57 ^{ab}	7,52±0,04 ^a	968±52,39 ^a	13,5±0,28 ^a
I	36,6±0,22 ^a	63,3±0,22 ^a	7,50±0,02 ^a	1000±21,30 ^{ab}	13,2±0,66 ^a

Hodnoty jsou průměry, ± směrodatná odchylka (n=3) a indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

U druhé kontrolní zakládky byl zaznamenán stejný rostoucí trend sušiny jako v předchozí kontrolní zakládce. Druhá kontrolní zakládka měla vyšší obsah sušiny než první kontrolní pokus. Průměrná hodnota sušiny byla 35,1 %. Statisticky významný rozdíl byl zjištěn mezi první a šestou vrstvou v obsahu sušiny. Nejvyšší vlhkost byla v nejmladší vrstvě a měla hodnotu 67,1 %. Vlhkost se snižovala jako u první kontrolní zakládky. Statisticky významný

rozdíl byl naměřen mezi první a šestou vrstvou. Hodnota pH se pohybovala v průměru kolem 7,4 a byla vyšší než v základce s čistírenským kalem č. 1. Po vyhodnocení nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi hodnotami pH. Rozdíl elektrické vodivosti byl 771 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mezi čtvrtou a druhou vrstvou. U elektrické vodivosti byl statisticky významný rozdíl právě mezi druhou a čtvrtou vrstvou. U poměru C:N byl zaznamenán malý rozptyl v datech. Hodnoty se pohybovaly od 12,2 do 13,6. Nejvyšší poměr byl v šesté vrstvě a nejmenší ve čtvrté vrstvě. Statisticky významný rozdíl nebyl zjištěn mezi poměrem C:N.

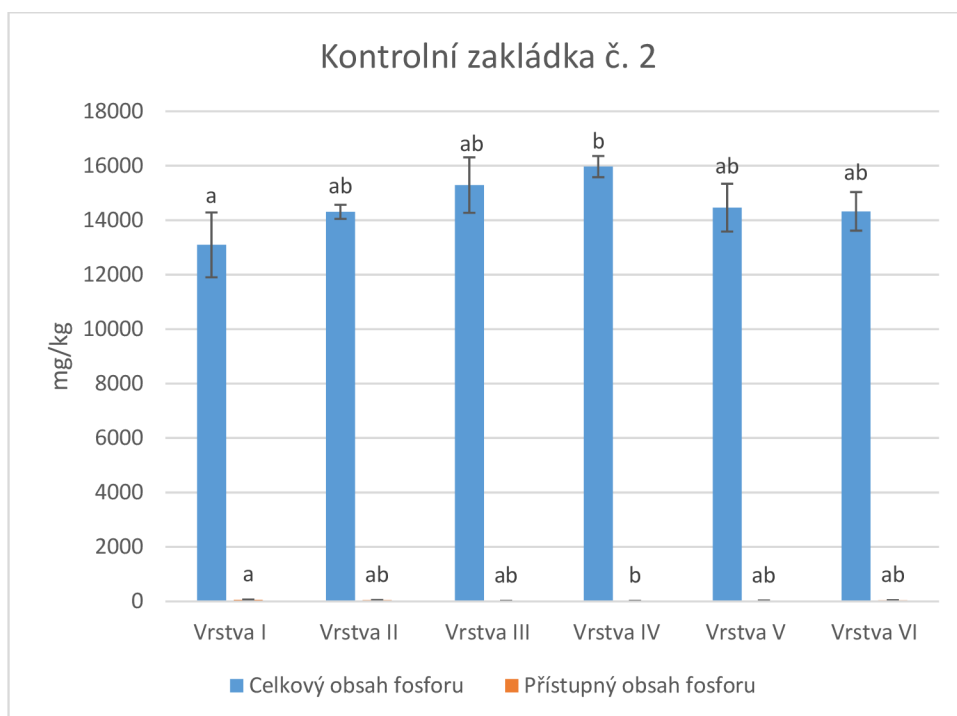
Graf č. 8: Celkový obsah vápníku v kontrolní základce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu ($P < 0,05$).

U hodnot v grafu č. 8 je vidět rostoucí trend. Obsah vápníku byl zaznamenán od 65152 mg/kg do 76303 mg/kg. Celkový obsah byl nižší než u první kontrolní základky. Nejméně vápníku bylo v první vrstvě a největší množství bylo nalezeno v poslední vrstvě. Statisticky významný rozdíl byl nalezen mezi první a šestou vrstvou, jak ukazují indexy v grafu.

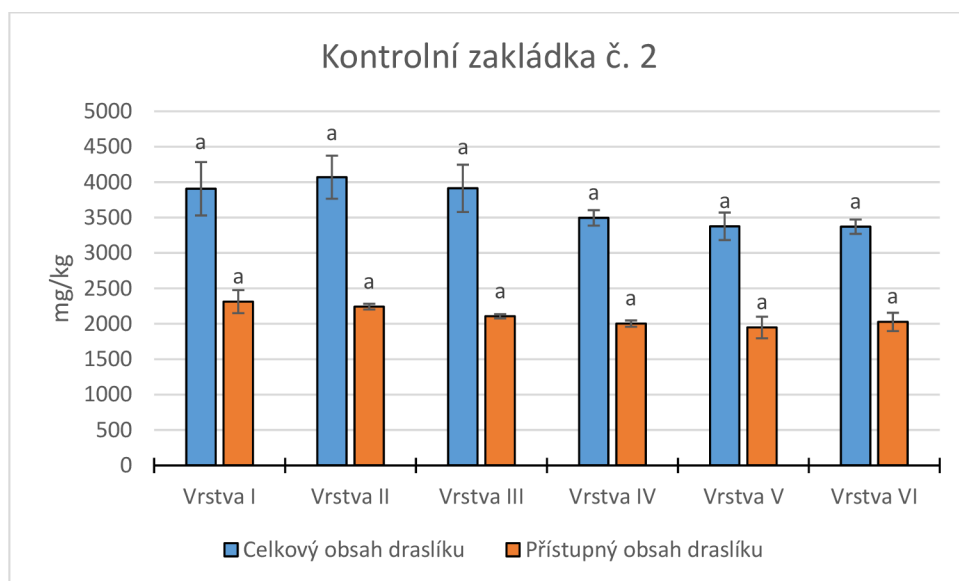
Graf č. 9: Celkový a přístupný obsah fosforu v kontrolní zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

V grafu č. 9 můžeme vidět, že obsah celkového fosforu rostl od první vrstvy do čtvrté, poté se obsah snižoval do šesté vrstvy. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána ve čtvrté vrstvě (15969 mg/kg), z toho obsahoval přístupný fosfor pouze 0,1 %. Nejnižší hodnotu celkového fosforu měla první vrstva (13093 mg/kg) a přístupné množství bylo 0,5 % z celkového množství. Celkový obsah fosforu byl nižší než u předchozí kontrolní zakládky. Podle statistického šetření byl zjištěn významný rozdíl mezi první a čtvrtou vrstvou. I zde byly velmi malé hodnoty přístupného obsahu fosforu. Přístupný obsah fosforu byl v rozmezí od 19 mg/kg do 59 mg/kg. Statisticky významný rozdíl byl nalezen mezi první a čtvrtou vrstvou.

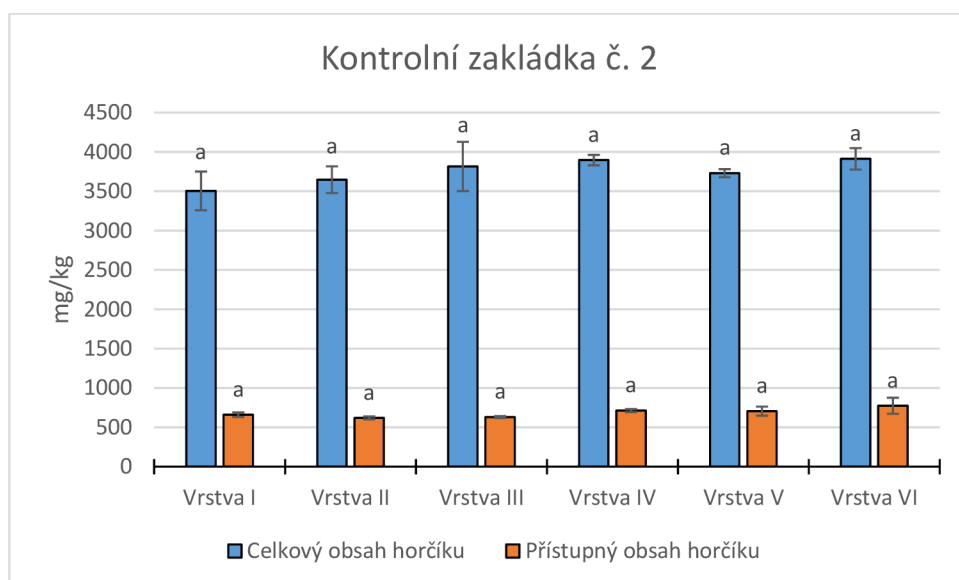
Graf č. 10: Celkový a přístupný obsah draslíku v kontrolní zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Na grafu č. 10 jsou zobrazeny jednotlivé hodnoty celkového a přístupného draslíku v každé vrstvě kontrolní zakládky č. 2. Celkový obsah draslíku měl nejnižší hodnotu 3370 mg/kg, z toho přístupný obsah byl 58 %. Nejvyšší množství celkového draslíku bylo 4069 mg/kg a přístupné množství bylo 55 % z celkového obsahu. Při statistickém vyhodnocení dat nebyl nalezen žádný významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupný obsah draslíku klesal od první vrstvy do páté vrstvy a od této vrstvy se zvýšila hodnota do šesté vrstvy. Rozptyl hodnot byl od 1947 mg/kg do 2312 mg/kg. Po statistickém zpracování dat nebyl zjištěn významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami.

Graf č.11: Celkový a přístupný obsah hořčíku v kontrolní zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Hodnoty ukazují množství celkového a přístupného obsahu hořčíku v jednotlivých vrstvách kontrolní zakládky č. 2. Nejvyšší hodnota celkového hořčíku byla naměřena 3911 mg/kg v šesté vrstvě, z toho bylo přístupné množství 20 %. Nejmenší obsah celkového hořčíku

byl 3503 mg/kg v první vrstvě a přístupné množství bylo 19 % z celkového množství. U celkového obsahu hořčičku nebyl vyhodnocen žádný statisticky významný rozdíl. Hodnoty přístupného hořčičku se výrazně nelišily a pohybovaly se nad 500 mg/kg. Rozptýl přístupného obsahu hořčičku byl od 620 mg/kg do 774 mg/kg. Statisticky významný rozdíl nebyl zjištěn mezi daty přístupného hořčičku.

5.5 Vermikompostovací zakládka se směsí č. 1

Tabulka č. 6: Počet žížal a biomasa ve verмикompostovací zakládce č. 1

Vrstva	Počet žížal (g/kg)	Biomasa (g/kg)
VI	391±70,23 ^b	81,7±21,07 ^b
V	387±63,17 ^a	79,8±24,86 ^{ab}
IV	304±22,86 ^a	56,8±10,10 ^{ab}
III	291±22,29 ^a	41,2±3,30 ^{ab}
II	153±31,26 ^a	16,1±2,74 ^{ab}
I	61±8,99 ^a	4,3±0,66 ^a

Hodnoty jsou průměry, ± směrodatná odchylka (n=3) a indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

U první verмикompostovací zakládky se směsí s kalem č. 1 byl zaznamenán nejvyšší počet žížal. Nejvyšší počet žížal byl zjištěn v nejmladší šesté vrstvě. Průměrný počet žížal byl 6 x vyšší v této vrstvě než v první vrstvě. Po statistickém vyhodnocení byl významný rozdíl mezi první a šestou vrstvou. Průměrná biomasa byla 81,7 g na kg vzorku v nejmladší vrstvě. Biomasa se snižovala stejně, jako počet žížal. V první vrstvě byla průměrná biomasa 20 x nižší než v šesté vrstvě. Průměrná biomasa byla 46,6 g/kg na verмикompostovací zakládku s čistírenským kalem č. 1. Statisticky významný rozdíl byl mezi první a šestou vrstvou v biomase jako u počtu žížal.

Tabulka č. 7: Fyzikálně-chemické parametry verмикompostovací zakládky č. 1

Vrstva	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC (μS/cm)	C:N
VI	27,2±0,33 ^b	72,8±0,33 ^b	7,09±0,04 ^{ab}	2122±162,34 ^{ab}	13,7±0,09 ^b
V	30,8±0,39 ^{ab}	69,2±0,39 ^{ab}	7,02±0,02 ^b	2182±129,12 ^b	13,9±0,28 ^{ab}
IV	31,5±0,17 ^{ab}	68,5±0,17 ^{ab}	7,05±0 ^{ab}	2147±24,94 ^{ab}	13,7±0,03 ^{ab}
III	32,2±0,31 ^{ab}	67,8±0,31 ^{ab}	7,39±0,05 ^{ab}	1648±85,05 ^{ab}	14,3±0,19 ^{ab}
II	33,2±0,45 ^a	66,8±0,45 ^a	7,41±0,03 ^{ab}	1126±49,37 ^{ab}	15,6±0,16 ^a
I	33,3±0,48 ^a	66,7±0,48 ^a	7,49±0,11 ^a	798±112,80 ^a	14,2±0,47 ^{ab}

Hodnoty jsou průměry, ± směrodatná odchylka (n=3) a indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

V první verмикompostovací zakládce se směsí č. 1 byl nejnižší obsah sušiny v nejmladší šesté vrstvě a nejvyšší sušina byla v první vrstvě. Hodnota byla 27,2 % v šesté vrstvě a v první vrstvě byla 33,3 %. Obsah sušiny byl vyšší se stářím vrstvy, pouze ve druhé vrstvě byl nižší. Statistickým šetřením byl zjištěn významný rozdíl u první, druhé a šesté vrstvy. Průměrná vlhkost se pohybovala od 66,7 % do 72,8 % ve verмикompostovací zakládce. Nejvyšší vlhkost

byla naměřena v šesté vrstvě a nejnižší vlhkost byla v první vrstvě. Po statistickém vyhodnocení byl významný rozdíl u první, druhé a šesté vrstvy jako u obsahu sušiny. Hodnota pH se snižovala z šesté na pátou vrstvy, následně pH rostlo od čtvrté do první vrstvy zakládky. Statisticky významný rozdíl byl naměřen mezi první a pátou vrstvou zakládky v hodnotách pH. Rozdíl pH byl 0,40 mezi první a pátou vrstvou. Mezi naměřenými daty byl značný rozdíl elektrické vodivosti. Elektrická vodivost měla hodnoty od 798 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do 2122 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vodivost se zvyšovala z šesté na pátou vrstvu, od čtvrté vrstvy vodivost klesala až do vrstvy první. Statisticky významný rozdíl byl prokázán mezi první a pátou vrstvou. Průměrný poměr C:N byl 14,2 na zakládku. Statistickým šetřením bylo zjištěno, že významný rozdíl byl nalezen v poměru C:N mezi druhou a šestou vrstvou.

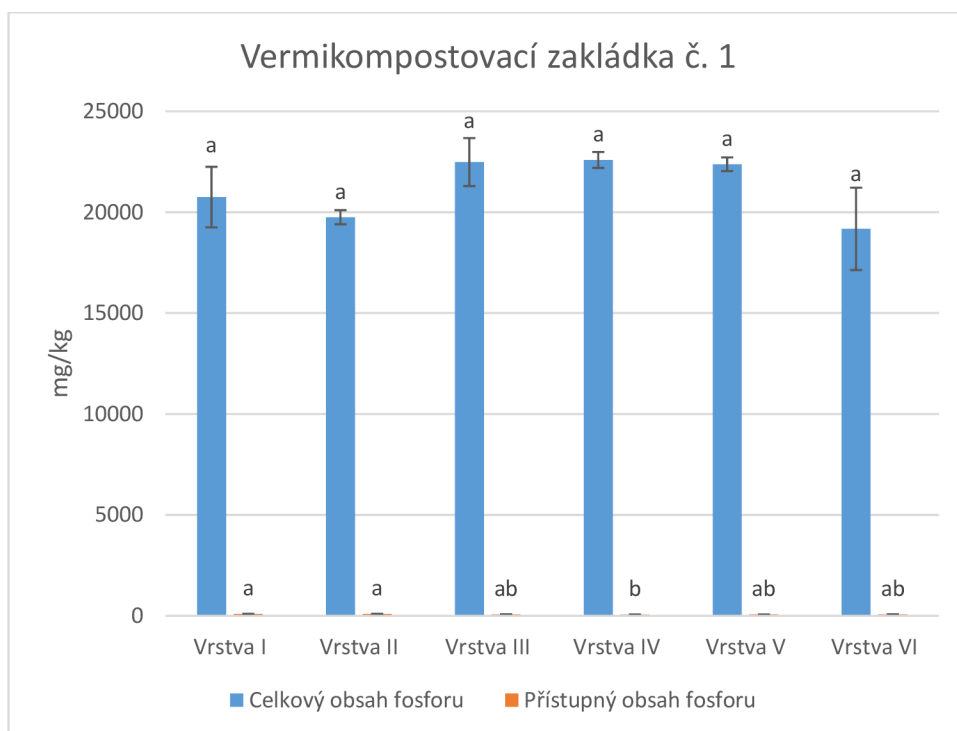
Graf č. 12: Celkový obsah vápníku ve vermikompostovací zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou ($n=3$), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu ($P<0,05$).

Hodnoty měly rostoucí trend od první do třetí vrstvy, od čtvrté vrstvy se hodnoty postupně snižovaly ve vermikompostovací zakládce č. 1. Obsah vápníku se pohyboval od 79318 mg/kg do 90098 mg/kg. Největší množství celkového obsahu vápníku bylo ve třetí vrstvě a nejnižší množství v šesté vrstvě. U vermikompostovací zakládky nebyl vyhodnocen statisticky významný rozdíl mezi vrstvami.

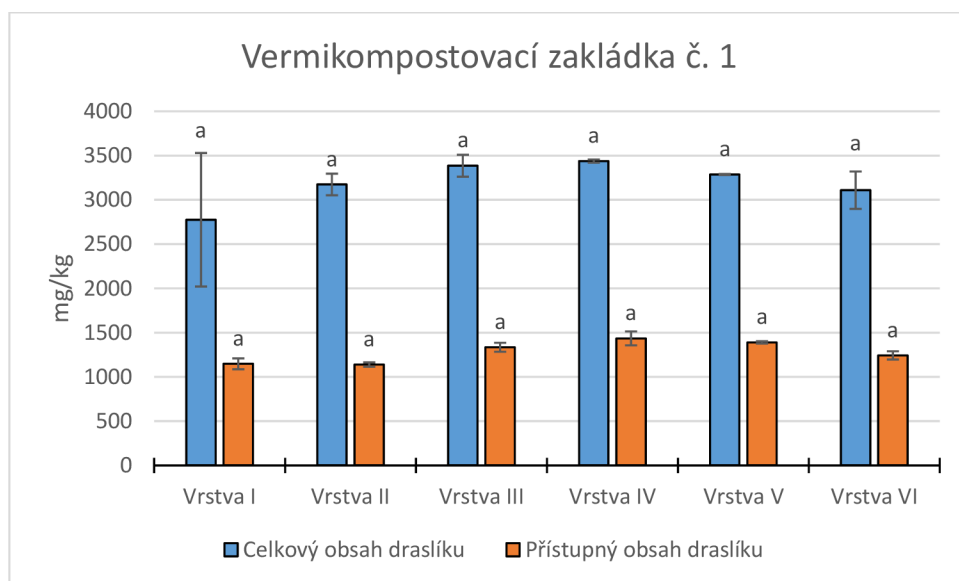
Graf č. 13: Celkový a přístupný obsah fosforu ve vermikompostovací zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

U vermikompostovací zakládky se snižovalo množství celkového fosforu od první do druhé vrstvy. Obsah fosforu se zvýšil od třetí vrstvy do čtvrté a od čtvrté vrstvy do šesté se opět snižoval. Nejvyšší obsah celkového fosforu (22587 mg/kg) byl naměřen ve čtvrté vrstvě, z toho tvořilo přístupné množství 0,3 %. Nejnižší celkový obsah fosforu (19174 mg/kg) se nacházel v první vrstvě a přístupné množství bylo pouze 0,4 % z celkového množství. U těchto zjištěných hodnot nebyl vyhodnocen statisticky významný rozdíl. Stejně jako v předchozích zakládkách byly naměřené hodnoty velice malé oproti celkovým obsahům. Nejvyšší obsah přístupného fosforu byl v první vrstvě a měl hodnotu 94 mg/kg. Nejnižší množství přístupného fosforu bylo 63 mg/kg ve čtvrté vrstvě. Statistickým šetřením jsme zjistili, že první a druhá vrstva má významný rozdíl od čtvrté vrstvy.

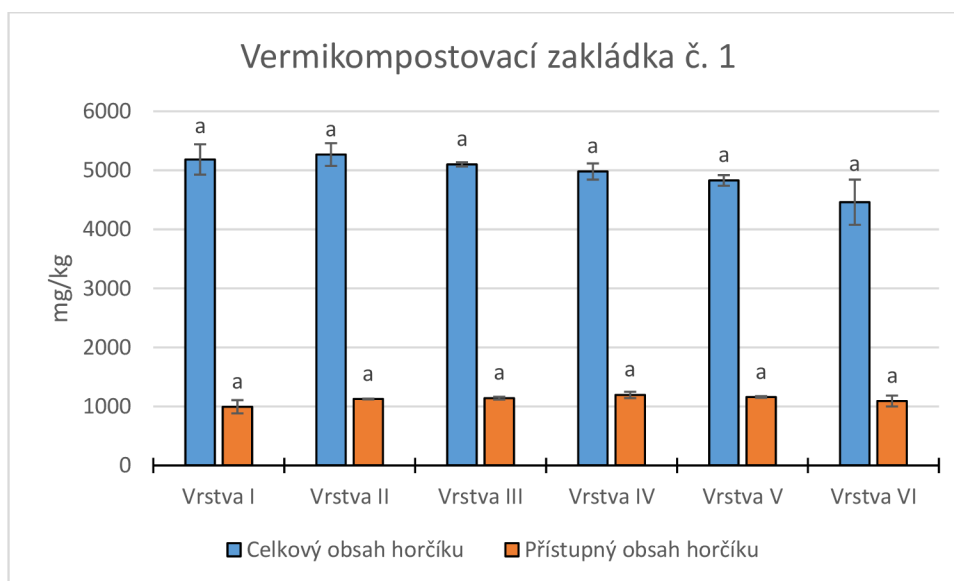
Graf č. 14: Celkový a přístupný obsah draslíku ve vermikompostovací zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu ($P < 0,05$).

V grafu č. 14 jsou zobrazeny hodnoty celkového obsahu a přístupného obsahu draslíku v jednotlivých vrstvách vermikompostovací zakládky č. 1. Celkové množství draslíku se zvyšovalo od první do čtvrté vrstvy a od čtvrté vrstvy se postupně snižovalo do šesté vrstvy ve vermikompostovací zakládce. V první vrstvě byla výrazná směrodatná odchylka oproti ostatním vrstvám. Nejnižší množství (2774 mg/kg) bylo nalezeno v první vrstvě, z toho přístupné množství bylo 41 %. Nejvyšší hodnotu celkového draslíku (3437 mg/kg) měla čtvrtá vrstva a přístupný obsah měla 42 % z celkového množství. Statistickým vyhodnocením nebyl nalezen významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupné množství draslíku klesalo od první do druhé vrstvy. Od druhé vrstvy do čtvrté se zvyšovalo a od čtvrté vrstvy do šesté vrstvy došlo k opětovnému snížení. Naměřené hodnoty byly od 1243 mg/kg do 1434 mg/kg. U přístupného obsahu draslíku nebyl vyhodnocen statisticky významný rozdíl mezi vrstvami ve vermikompostovací zakládce č. 1.

Graf č. 15: Celkový a přístupný obsah hořčíku ve vermikompostovací zakládce č. 1



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

U celkového a přístupného hořčíku byly hodnoty podstatně vyšší ve vermikompostovací zakládce než u kontrolní zakládky. Celkový obsah hořčíku se zvyšoval od první do druhé vrstvy a obsah postupně klesal od druhé vrstvy do šesté. Nejvyšší množství bylo naměřeno 5266 mg/kg ve druhé vrstvě, z toho byl přístupný hořčík 21 %. Nejnižší hodnota celkového hořčíku byla nalezena 4459 mg/kg v šesté vrstvě, z toho tvořilo přístupné množství 24 %. Statistickým šetřením nebyl nalezen významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupný obsah hořčíku se pohyboval kolem 1000 mg/kg. Po statistickém vyhodnocení nebyl zjištěn žádný významný rozdíl.

5.6 Vermikompostovací zakládka se směsí č. 2

Tabulka č. 8: Počet žížal a biomasa ve vermikompostovací zakládce č. 2

Vrstva	Počet žížal	Biomasa (g/kg)
VI	319±25,32 ^b	51±5,07 ^b
V	239±14,64 ^{ab}	50,9±3,56 ^{ab}
IV	165±25,32 ^{ab}	25,6±4,33 ^{ab}
III	77±12,26 ^{ab}	10,6±0,86 ^{ab}
II	77±6,60 ^{ab}	8,9±1,36 ^{ab}
I	63±9,57 ^a	4,7±1,09 ^a

Hodnoty jsou průměry, ± směrodatná odchylka (n=3) a indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Ve druhé vermikompostovací zakládce se směsí č. 2 byl nižší počet žížal než u první vermikompostovací zakládce se směsí č. 1. Nejvyšší počet žížal obsahovala šestá přidaná vrstva a měla 5 x vyšší počet žížal než první vrstva. Zastoupení žížal bylo nižší s přibývajícím stářím vrstvy jako v předchozí vermikompostovací zakládce. Průměrná biomasa byla nižší oproti první vermikompostovací zakládce, a to skoro o polovinu než v předchozím pokusu.

Hodnota průměrné biomasy byla 25, 3 g na kg ve vermikompostovací zakládce. Množství biomasy bylo skoro 11 x vyšší v šesté vrstvě než u první vrstvy.

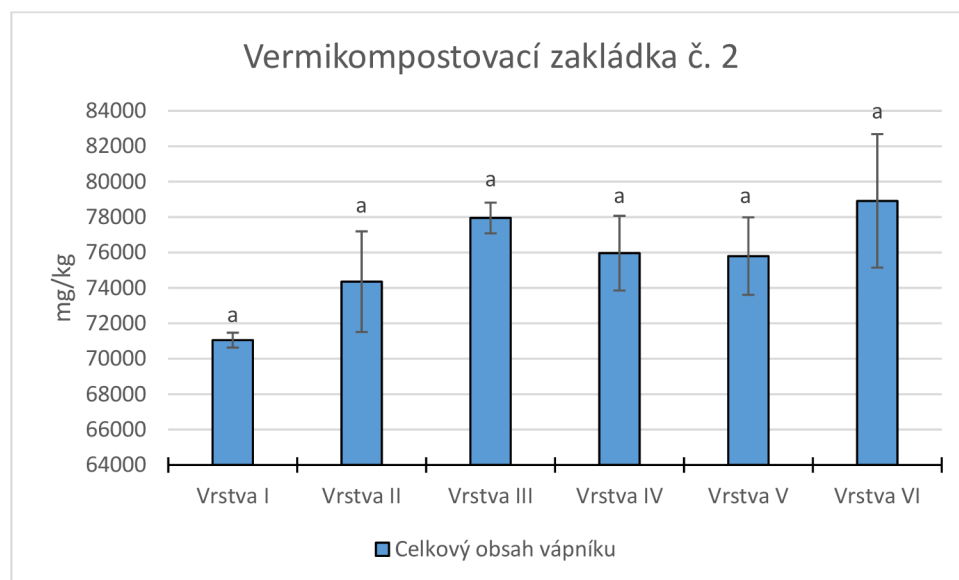
Tabulka č. 9: Fyzikálně-chemické parametry vermikompostovací zakládky č. 2

Vrstva	Sušina (%)	Vlhkost (%)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C:N
VI	24 \pm 0,57 ^b	76 \pm 0,57 ^b	7,14 \pm 0,03 ^b	2240 \pm 37,42 ^b	13,8 \pm 0,21 ^b
V	24,8 \pm 0,40 ^{ab}	75,2 \pm 0,40 ^{ab}	7,18 \pm 0,03 ^{ab}	2110 \pm 29,44 ^{ab}	14,2 \pm 0,20 ^{ab}
IV	26,1 \pm 0,52 ^{ab}	73,9 \pm 0,52 ^{ab}	7,55 \pm 0,06 ^{ab}	1422 \pm 86,46 ^{ab}	15,3 \pm 0,23 ^{ab}
III	27,8 \pm 0,59 ^{ab}	72,2 \pm 0,59 ^{ab}	7,60 \pm 0,04 ^a	1225 \pm 127,19 ^{ab}	14,4 \pm 0,06 ^{ab}
II	30,6 \pm 0,98 ^a	69,4 \pm 0,98 ^a	7,49 \pm 0,02 ^{ab}	1068 \pm 29,88 ^{ab}	17,1 \pm 1,81 ^a
I	30,5 \pm 0,61 ^{ab}	69,5 \pm 0,61 ^{ab}	7,52 \pm 0,04 ^{ab}	963 \pm 39,23 ^a	18 \pm 0,58 ^a

Hodnoty jsou průměry, \pm směrodatná odchylka (n=3) a indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Druhá vermikompostovací zakládka měla nižší obsah sušiny než první. Rozdíl byl 6,6 % mezi druhou a šestou vrstvou. Statisticky významný rozdíl byl nalezen u druhé a šesté vrstvy. Průměrná vlhkost byla 72,7 % ve vermikompostovací zakládce. Statisticky významný rozdíl byl mezi druhou a šestou vrstvou. Hodnota pH se zvyšovala se stářím vrstvy, pouze v druhé vrstvě došlo ke snížení hodnoty pH. Rozmezí pH se pohybovalo od 7,14 do 7,60. Statisticky významný rozdíl byl zaznamenán mezi třetí a šestou vrstvou. Elektrická vodivost měla velký rozptyl v datech. Šestá vrstva měla 2 x vyšší vodivost než první vrstva. Statisticky významný rozdíl byl nalezen mezi první a šestou vrstvou. Průměrný poměr C:N byl 15,4 ve vermikompostovací zakládce. Nejnižší hodnota C:N byla v šesté vrstvě a nejvyšší v první vrstvě. Statisticky významný rozdíl byl mezi první a šestou vrstvou.

Graf č. 16: Celkový obsah vápníku ve vermikompostovací zakládce č. 2

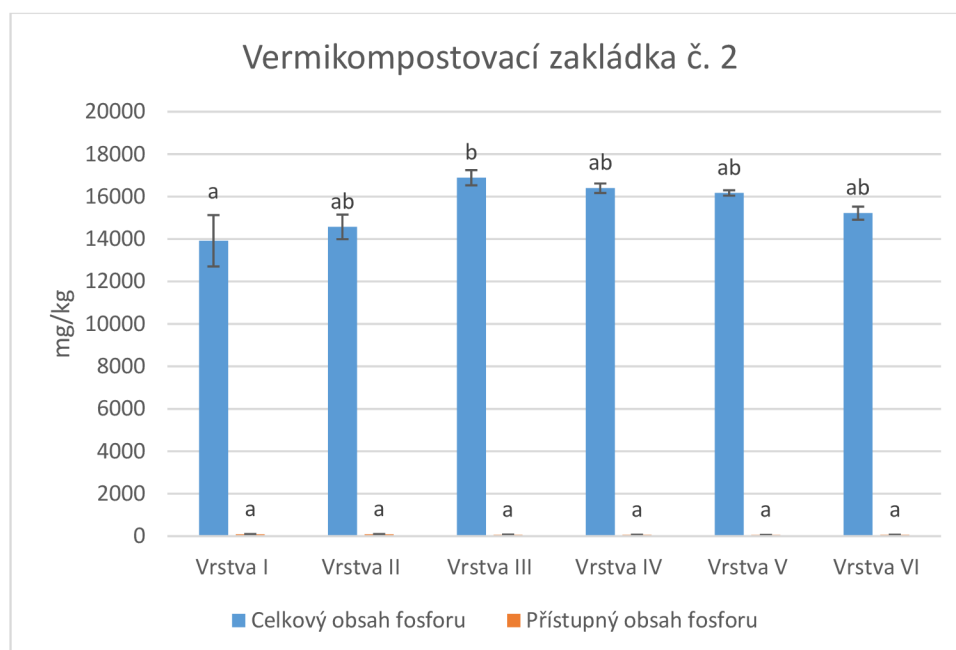


Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Celkový obsah vápníku měl rostoucí trend jako u předchozí vermikompostovací zakládky. Hodnoty se snižovaly od třetí vrstvy. V poslední vrstvě se výrazně zvýšila hodnota. Hodnoty se pohybovaly od 71051 mg/kg do 78914 mg/kg. Nejvyšší obsah vápníku byl naměřen

v šesté vrstvě a nejnižší obsah byl v první vrstvě. Hodnoty měly vyšší směrodatnou odchylku než u předchozí vermikompostovací zakládky. Nebyl vyhodnocen žádný statisticky významný rozdíl v datech.

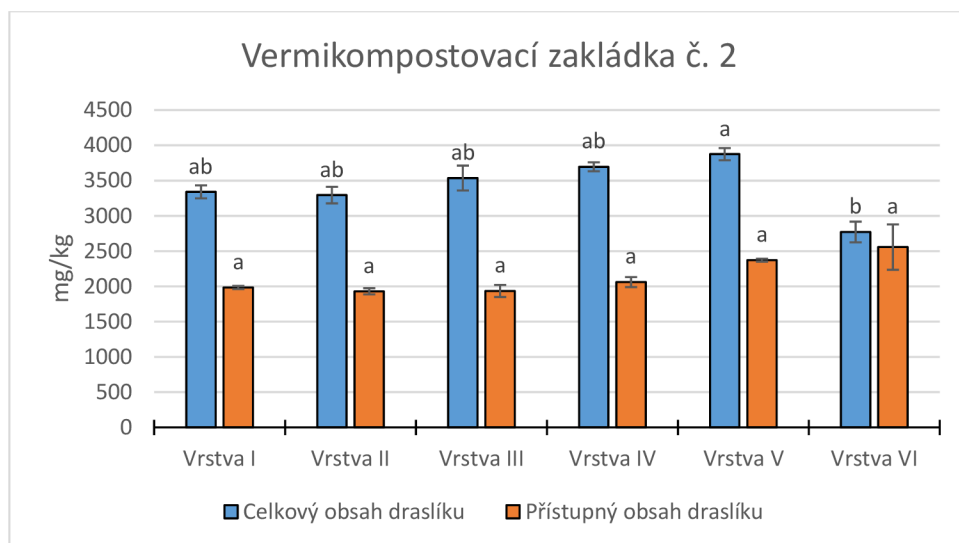
Graf č. 17: Celkový a přístupný obsah fosforu ve vermikompostovací zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Ve vermikompostovací zakládce č. 2 se zvyšoval obsah celkového fosforu od první vrstvy do třetí vrstvy. Celkový obsah fosforu se snižoval od třetí vrstvy do šesté vrstvy. Nejnižší hodnota celkového obsahu fosforu (13916 mg/kg) byla naměřena v první vrstvě, z toho obsahovala přístupné množství pouze 0,6 %. Největší množství bylo zjištěno ve třetí vrstvě a mělo hodnotu 16888 mg/kg, z této hodnoty bylo přístupné množství 0,4 %. Podle statistického šetření byl vyhodnocen významný rozdíl mezi první vrstvou a třetí vrstvou. U všech měření přístupného obsahu fosforu vyšly velmi nízké hodnoty a stejně tomu bylo ve vermikompostovací zakládce č. 2. Množství přístupného obsahu fosforu bylo od 61 mg/kg do 88 mg/kg. Po vyhodnocení dat ve statistice nebyl zjištěn žádný významný rozdíl v jednotlivých vrstvách.

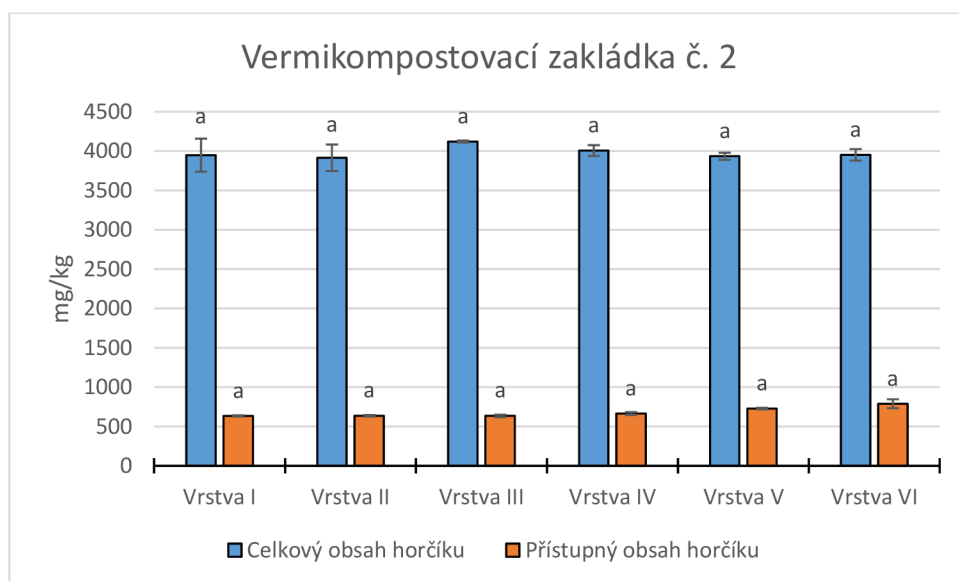
Graf č. 18: Celkový a přístupný obsah draslíku ve vermikompostovací zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

V grafu jsou znázorněny výsledky změřených hodnot celkového a přístupného obsahu draslíku. U celkového obsahu draslíku hodnoty klesají od první do druhé vrstvy. Množství draslíku se zvyšuje od druhé vrstvy do páté vrstvy a od páté vrstvy do šesté vrstvy došlo k výraznému snížení. Nejvyšší celkový obsah draslíku (3874 mg/kg) byl naměřen v páté vrstvě, z toho přístupné množství bylo 53 %. Nejnižší hodnota celkového draslíku (2770 mg/kg) byla zaznamenána v šesté vrstvě, z toho tvořil přístupný obsah 92 %. Po statistickém vyhodnocení byl zjištěn významný rozdíl mezi pátou a šestou vrstvou. Hodnoty přístupného obsahu draslíku se snižovaly od první vrstvy do druhé a od druhé vrstvy do šesté postupně rostly. Výrazná směrodatná odchylka byla vyhodnocena v šesté vrstvě oproti ostatním vrstvám. Rozptýl byl přístupného množství draslíku od 1930 mg/kg do 2556 mg/kg. Při statistickém šetření nebyl prokázán žádný významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami.

Graf č. 19: Celkový a přístupný obsah hořčíku ve vermikompostovací zakládce č. 2



Hodnoty jsou průměry se směrodatnou odchylkou (n=3), indexy udávají statisticky významné rozdíly podle Kruskal – Wallisova testu (P<0,05).

Množství celkového a přístupného obsahu hořčíku bylo výrazně menší než v předchozí vermikompostovací základce. Hodnoty se pohybovaly kolem 4000 mg/kg. Nejvyšší množství bylo naměřeno ve třetí vrstvě, hodnota byla 4120 mg/kg, z toho přístupné množství bylo 15 %. Nejnižší obsah celkového hořčíku byl nalezen ve druhé vrstvě a obsah byl 3913 mg/kg, z toho tvořilo přístupné množství 16 %. Po vyhodnocení nebyl zjištěn žádný významný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami. Přístupný obsah hořčíku byl v každé vrstvě nad 600 mg/kg. U přístupného obsahu hořčíku nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi vrstvami vermikompostovací základky.

6 Diskuze

Při výzkumu vermikompostování se nejčastěji sledují parametry jako obsah sušiny, pH, elektrická vodivost, vlhkost, poměr C:N, počet žížal a biomasa žížal, které určují kvalitu a stabilizaci vermikompostovacích zakládek.

Všechny zakládky byly namíchaný v hmotnostním poměru čistírenského kalu a odpadního papíru 1:2. Poměr můžeme vyjádřit v procentech jako 33,3 % čistírenského kalu a 66,7 % nasávané kartonáže.

U dvou zkoumaných vermikompostovacích zakládek byl potvrzen vyšší počet žížal v mladších vrstvách, z důvodu spotřebování přidávané namíchané směsi kalů a nasávané kartonáže. Nejvyšší počet žížal a nejvyšší biomasa byla zaznamenána v nejmladší vrstvě vermikompostovací zakládky se směsí s prvním čistírenským kalem. Na začátku pokusu bylo 100 jedinců žížal na litr v každé vermikompostovací zakládce. V první vermikompostovací zakládce byl počet žížal 391 na kg na konci pokusu. Druhá vermikompostovací zakládka měla nižší hodnoty. Počet žížal byl 319 na kg na konci pokusu. Elvira et al. (1998) vermikompostovali kravský hnůj, kaly z mlékárenského a papírenského průmyslu. Experiment probíhal ve čtyřech vermikompostovacích zakládkách. V první vermikompostéru bylo 100 % kravského hnoje. Druhý vermikompost obsahoval směs 80 % kravského hnoje a 20 % kalu z papírenského průmyslu. Třetí vermikompostovací zakládka měla poměr surovin 80 % kravského hnoje a 20 % kalu z mlékárenského průmyslu. Čtvrtá vermikompostovací zakládka obsahovala 60 % kravského hnoje, 20 % kalu z papírenského průmyslu a 20 % kalu z mlékárenského průmyslu. První vrstva zakládky měla 90 kg směsi a obsahovala 1500 žížal. Pokus probíhal šest měsíců. Po dvou a čtyřech měsících byla přidána další vrstva, která měla stejnou hmotnou jako na začátku pokusu. Vlhkost se udržovala mezi 80–85 %. Vzorky se odebíraly po třech a šesti měsících z každé zakládky. Po odebrání byly vzorky vysušeny. Nejvyšší množství žížal bylo zaznamenáno ve vermikompostu se 100% kravským hnojem a druhé nejvyšší hodnoty měl čtvrtý vermikompost. Směs papírenského kalu, kalu z mlékárenského průmyslu a kravského hnoje zvýšila počet žížal ze 17 jedinců / kg na 168 jedinců / kg během šesti měsíců ve vermikompostu. Tvrdí, že směs dvou kalů a kravského hnoje je vhodná pro žížaly rodu *Esenia anderii*. Zvýšení počtu žížal odpovídalo dostatku potravy pro žížaly.

Biomasa většinou odpovídá počtu žížal a byla zjištěna u nejmladších vrstev vermikompostovacích zakládek. Elvira et al. (1998) stanovili, že nejvyšší množství biomasy se nacházelo ve směsi papírenského kalu, kalu mlékárenského průmyslu a kravského hnoje. Biomasa papírenského kalu, kalu z mlékárenského průmyslu a kravského hnoje byla 15,86 g/kg. Po šesti měsících vermikompostování byla stanovena biomasa z první vrstvy našeho výzkumu. První vermikompost měl 4,3g/kg a druhý 4,7g/kg. Biomasa z vermikompostování kalů měla vyšší množství sušiny. Je to způsobeno tím, že kaly mají vyšší obsah živin pro žížaly a mikroorganismy.

Rychlost růstu žížal a rozmnožování souvisí s obsahem vlhkosti ve vermikompostovací zakládce. Pro efektivní vermikompostování se uvádí rozsah mezi 50–80 %. Nízká vlhkost zpomaluje vývoj žížal a může dojít k úhynu žížal (Ali et al. 2015). Vlhkost ve čtyřech zakládkách se postupně snižovala s přibývajícím stářím vrstvy. Hodnota vlhkosti byla ve vermikompostovací zakládce se směsí č.2 69,53 %. Druhá vermikompostovací zakládka měla výslednou vlhkost 66,73 %. Kontrolní zakládky bez žížal měly obsahy vlhkosti č.1 64,17 % a č.2 64,30 %. Podle ČSN 46 5736 má být vlhkost ve vermikompostovací zakládce v rozmezí 50–70 %. Ve studii Mupondi et al. (2010) prováděli pokus vermikompostování a kompostování směsí kravského hnoje a odpadního papíru. Směsi byly namíchaný v poměru C:N 30:1 a 45:1. Vlhkost byla udržována okolo 80 %. Pro pokus byl vybrán druh *Eisenia fetida*.

Vermikompostování probíhalo v boxech a doba pokusu byla 8 týdnů. Vzorky byly odebrány na začátku pokusu, ve čtvrtém týdnu a na konci pokusu. Vzorky se vysušily pro další stanovení. Potvrdilo se, že ideální vlhkost pro žížaly ve vermikompostu se pohybuje kolem 80 %, protože žížaly dostatečně rychle zpracovávají organický materiál a vytvořily kvalitní vermikompost. Vlhkost ve zkoumaných vermikompostovacích zakládkách měla optimální podmínky pro žížaly.

Neutrální prostředí je ideální pro činnost žížal. Příznivé pH pro žížaly se udává mezi 4,5 – 9,0. Podle ČSN 46 5736 hodnota pH má být v rozmezí od 6,0 do 9,0. Rozkladem organické hmoty během vermikompostování dochází ke snížení hodnoty pH v důsledku vzniku některých meziproductů. Jedná se o huminové kyseliny. Kompostované materiály zásadně ovlivňují hodnotu pH. V první vermikompostovací zakládce vyšlo konečné pH 7,49 a druhá měla hodnotu pH 7,52. Kontrolní zakládky měly hodnoty pH č.1 7,45 a č.2 7,50. Snížení hodnoty pH se připisuje mineralizaci dusíku a fosforu. Dále přispívá rozklad organického materiálu na meziproducty organických kyselin. Garg & Gupta (2007) zkoumali stabilizaci čistírenských kalů během vermikompostování. Vstupní suroviny byly kravský hnůj a primární čistírenský kal. Pro výzkum byly použity žížaly *Eisenia fetida*. Pokus probíhal v šesti vermireaktorech, které měly objem 10 litrů. První měl pouze 100 % kravského hnoje, druhý obsahoval 90 % kravského hnoje a 10 % kalu, třetí směs byla 80 % hnoje a 20 % kalu, čtvrtá byla 70 % hnoje a 30 % kalu, pátá obsahovala 60 % hnoje a 40 % kalu a poslední měla 50 % kravského hnoje a 50 % kalu. Výzkum probíhal po dobu 11 týdnů. Vzorky byly vysušeny pro stanovení fyzikálně-chemických parametrů. Hodnota pH se snížila ze zásadité na kyselejší. Počáteční pH směsi 70 % kravského hnoje a 30 % kalu bylo 8,1 a na konci pokusu se snížilo na 7. To se potvrzuje i ve studii Khwairakpam & Bhargava (2009). Změna pH se vztahuje k mineralizaci fosforu a dusíku na dusitany, dusičnany a fosfáty. Dále ke vzniku meziproductů organických kyselin během přeměny organického materiálu. Snížení hodnoty pH ze zásadité na kyselejší se u našich vermikompostovaných zakládek neprokázalo, protože se hodnota pH nepatrně zvýšila.

Na začátku vermikompostování byla elektrická vodivost v první směsi 1176 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a ve druhé směsi 1021 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na konci vermikompostování byla naměřena v prvním vermikompostovací zakládce 798 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a ve druhé vermikompostovací zakládce byla nalezena hodnota 963 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kontrolní zakládky měly hodnoty 804 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Amouie et al. (2017) zkoumali vermikompostování čistírenského kalu a tuhého odpadu s rýžovou slámou. Pro vermikompostování byly použity žížaly *Eisenia fetida*. Pokus probíhal ve vermireaktorech po dobu 70 dní. Směsi byly namíchaný v poměru 75 % kalu nebo tuhého odpadu a 25 % rýžové slámy. Po odebrání byly vzorky vysušeny pro další analýzy. Na začátku vermikompostování byla vodivost 1485 $\mu\text{S}/\text{cm}$ u kalu a varianta tuhého odpadu měla vodivost 1459 $\mu\text{S}/\text{cm}$. U obou variant nebyl výrazný rozdíl ve výsledných hodnotách elektrické vodivosti. Podle výsledků byla elektrická vodivost na konci vermikompostování 636 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Z toho lze vyvodit, že činností žížal a rozkladem organické hmoty se snižuje elektrická vodivost. Důvodem je akumulace některých minerálů v těle žížal. Vývoj elektrické vodivosti se shoduje i s výsledky ve studii Ganguly & Chakraborty (2019).

Poměr C:N je nejspolehlivější ukazatel stupně rozkladu organického materiálu. Žížaly tráví polysacharidy a podporují rozvoj mikrobů, kteří zrychlují degradaci organické hmoty a fixaci dusíku. To má za následek větší pokles C:N než u klasického kompostování (Sonowal et al. 2013). Materiál, který byl dostatečně stabilizován, měl konečný poměr C:N pod hodnotou 20. Vyšší poměr naznačuje, že materiál nebyl dostatečně stabilizován a měl vyšší obsah přístupného uhlíku (Edwards et al. 2010). Počáteční poměr C:N byl 25:1 u vermikompostovaných směsí. Ve všech vermikompostovaných zakládkách bylo znatelné snížení poměru C:N. V první vermikompostovací zakládce byl poměr C: N 15:1. Ve druhé vermikompostovací zakládce byl vyhodnocen poměr C:N od 18:1. Kontrolní zakládky měly

poměr C:N 16:1 a 13:1. Tauseef et al. (2021) zkoumal vermikompostování biologicky rozložitelného rafinérského odpadu a odpadního papíru. Vermikompostování probíhalo v novém zařízení složeného ze sady modulových vermireaktorů nazývané HEVSTOW. Poměr surovin nebyl ve studii uveden. Směsi byly odpadní papír s kravským hnojem a rafinérský odpad s vodním hyacintem. Pokus probíhal 6 měsíců a byly použity dva druhy žížal. Jednalo se o *Eisenia andrei* a *Lumbricus rubellus*. Na začátku vermikompostování byl poměr C:N 25:1. Vzorky byly vysušeny pro podrobné analýzy. Ve směsi odpadního papíru s *Eisenia andrei* byl konečný poměr C:N 14:1 a u žížal *Lumbricus rubellus* bylo C:N 13:1. Technický požadavek na poměr C:N je uveden v ČSN 46 5736 maximálně do 30:1. Ve vermikompostovaných zakládkách došlo k výraznému snížení poměru C:N, které potvrzuje stabilizaci biologicky rozložitelného materiálu jako ve studii od Tauseef et al. (2021).

V první vermikompostovací zakládce bylo naměřeno 20747 mg/kg celkového množství fosforu. Hodnota převedena na vyjádření v procentech tedy činí 2,07 %. Druhá vermikompostovací zakládka měla menší množství fosforu 13917 mg/kg neboli 1,39 %. V kontrolních zakládkách bylo nalezeno množství 17621 mg/kg (kontrola č.1) a 13093 mg/kg (kontrola č.2). Celkové množství fosforu se během vermikompostování podstatně zvýšilo. Khwairakpam & Bhargava (2009) uvádí, že zvýšení celkového množství fosforu je způsobeno mobilizací fosforu bakteriemi, mineralizací a aktivitou žížal. Hanč & Plíva (2013) uvádí, že vermikompostováním se zvyšuje celkový obsah živin, dostupnost P a K. Pokus probíhal na předkompostování kuchyňského odpadu a následném vermikompostování s dřevní štěpkou nebo odpadním papírem. Byly použity čtyři varianty směsí. První varianta byla 75 % předkompostovaného kuchyňského odpadu a 25 % dřevní štěpky. Druhá byla 50 % předkompostovaného kuchyňského odpadu a 50 % odpadního papíru. Třetí byla 75 % čerstvého kuchyňského odpadu a 25 % dřevní štěpky. Čtvrtá byla 50 % čerstvého kuchyňského odpadu a 50 % odpadního papíru. Pro výzkum byly využity žížaly *Eisenia fetida*. Pokus probíhal po dobu 100 dní. Každý vzorek se vysušil pro fyzikálně-chemické stanovení hodnot. Na konci výzkumu obsahovaly vermikomposty celkového množství fosforu od 0,4 do 2,9 %. Čistírenské kaly s bioodpadem ze zahrad měly množství celkového fosforu podobné zkoumaným vermikompostovaným zakládkám. Podle technické normy 46 5736 má kvalitní vermikompost minimálně 0,22 % fosforu. Čistírenské kaly jsou bohaté na živiny, proto obsahují velké množství fosforu. Zkoumané vermikompostovací zakládky měly celkově vysoký obsah fosforu a jsou vhodné pro zemědělské účely.

Během procesu degradace materiálu dochází k mineralizaci draslíku. Zejména střevní enzymy žížal přeměňují celkový draslík na přístupnější formy draslíku. Ztráta organické hmoty vede k uvolnění draslíku. (Ananthanarayanan et al. 2021). Celkový obsah draslíku se zvýšil oproti směsi namíchané na začátku vermikompostování. Před vermikompostováním směsi č.1 byl celkový obsah 2237 mg/kg a po vermikompostování byl 2775 mg/kg tedy 0,27 %. Druhá směs měla obsah draslíku 2415 mg/kg a po vermikompostování byl 3340 mg/kg tedy 0,33 %. Kontroly měly množství draslíku 4040 mg/kg a 3900 mg/kg. Khwairakpam & Bargava (2009) se zabývali vermikompostováním čistírenských kalů. Pro výzkum byly použity tři druhy žížal *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavantus*. Experiment probíhal v osmi plastových boxech o objemu 6 litrů. Do sedmi boxů bylo přidáno 1,2 kg kalu a 50 g žížal. Pokus probíhal 45 dní. Vzorky se odebíraly 15. den, 30. den, 45. den a vysoušely se pro další stanovení. Na začátku výzkumu bylo celkové množství draslíku ve směsi 0,86 %. Po 45 dnech bylo celkového množství draslíku ve vermikompostu s *Eisenia fetida* 1,5 %. Podle ČSN 46 5736 kvalitní vermikompost obsahuje minimálně 0,42 % celkového draslíku. Hodnoty byly vyšší než u našich vermikompostů, protože čistírenské kaly a odpadní papír mají malé obsahy draslíku.

Obsah celkového vápníku se ve vermikompostovaných zakládkách zvýšil oproti původním směsím před vermikompostováním. Yadav & Garg (2011) uvádí, že významné

zvýšení celkového vápníku během vermikompostování bylo zaznamenáno u průmyslových a organických odpadů. Zjistili, že žížaly ovlivňují proces mineralizace a přeměňují část vápníku z vazebné formy na volné formy. Zvýšené množství vápníku bylo nalezeno také v exkrementech žížal. Nejvyšší množství vápníku bylo nalezeno v první vermikompostovací zakládce 9 %. U druhé vermikompostovací zakládka byl obsah vápníku 7,9 %. V kontrolních zakládkách bylo menší množství celkového vápníku. V kontrole č.1 bylo množství 8,4 % a kontrola č. 2 měla hodnotu 7,6 %. Hanč & Plíva (2013) uvádí, že vermikompostováním se zvyšuje obsah vápníku. Vermikomposty s kuchyňským odpadem, odpadním papírem a dřevní štěpkou měly hodnoty celkového vápníku mezi 1,2 % až 9,5 %. Vyšší obsah vápníku vyjadřuje spojení čistírenského kalu s odpadním papírem.

Celkový obsah hořčíku na začátku vermikompostování byl 4304 mg/kg v první směsi. Druhá vermikompostovací zakládka měla množství celkového hořčíku 3047 mg/kg. Na konci vermikompostování v první zakládce se množství zvýšilo na 5184 mg/kg tedy 0,52 %. Ve druhé vermikompostovací zakládce bylo celkové množství 3947 mg/kg tedy 0,39 %. Kontrolní zakládky měly množství 4027 mg/kg a 3503 mg/kg. Dusa et al. (2020) zkoumali vermikompostování tří druhů čistírenských kalů. Pro výzkum byly využity žížaly *Eisenia fetida* a *Eisenia andrei*. Výzkum probíhal v plastových boxech po dobu 45 dní. Byly tři varienty a v každé byl pouze samostatný čistírenský kal. Na konci pokusu se odebraly vzorky a následně se sušily. Dusa et al. (2020) zjistili, že během vermikompostování tří druhů čistírenských kalů vyšly hodnoty celkového hořčíku 1,08 %, 1,10 % a 1,05 %. Čistírenské kaly obsahují vyšší hodnoty hořčíku kvůli znečištění odpadních vod. Ve studii dochází stejně ke zvýšení obsahu hořčíku. Podle zmíněné literatury se žížaly podílí na mineralizaci hořčíku během vermikompostování, protože byly nalezeny vyšší obsahy vápníku u vermikompostu než u kompostu bez žížal. (Ananthanarayanan et al. 2021).

Na začátku vermikompostování bylo přístupné množství fosforu pouze 1 % z celkového množství v první směsi. Ve druhé směsi bylo přístupné množství fosforu 2 % z celkového množství. Po vermikompostování se množství přístupného fosforu snížilo v první vermikompostovací zakládce na 0,5 % z celkového množství. Ve druhé vermikompostovací zakládce se snížil přístupný fosfor na 0,6 % z celkového množství. Kontroly měly přístupné množství fosforu 0,5 % z celkového množství. Vermikompostování snadněji zpřístupňuje nedostupné formy pro rostliny na dostupnější a zvyšuje se množství přístupného fosforu. Ve vermikompostovacích zakládkách se tento způsob nepotvrdil. Přístupné množství draslíku a hořčíku se zvýšilo stejně jako předchozí prvky. Původní směs č. 1 měla přístupné množství draslíku 22 % z celkového množství a přístupné množství hořčíku 35 % z celkového množství. Ve druhé směsi bylo přístupné množství draslíku 39 % z celkového množství a přístupné množství hořčíku 20 % z celkového množství. Po vermikompostování vyšel přístupný draslík 41 % z celkového množství a přístupné množství hořčíku vyšlo 19 % z celkového množství v prvním vermikompostu. Ve druhém vermikompostu bylo přístupné množství draslíku 59 % z celkového množství a přístupné množství hořčíku bylo 16 % z celkového množství. Přístupné množství draslíku bylo 51 % z celkového množství v první kontrole a druhá měla 59 % z celkového množství. První kontrola měla přístupné množství hořčíku 22 % z celkového množství a druhá měla přístupné množství hořčíku 19 % z celkového množství. Hanč & Dreslová (2016) posuzovali agrochemické vlastnosti kompostů a vermikompostů. Vstupní suroviny byly digestát, čistírenský kal, odpadní papír, sláma, kuchyňský odpad a zahradní odpad. Byly vytvořeny tři směsi a rozděleny do šesti nádob. První dvě nádoby měly 50 % digestátu a 50 % slámy. Další dvě obsahovaly 50 % kuchyňského odpadu a 50 % odpadního papíru. Poslední dvě směsi měly 50 % čistírenského kalu a 50 % zahradního odpadu. U každé směsi probíhalo vermikompostování a kompostování. Směsi bioodpadu se nejdříve předkompostovaly. Následně probíhalo vermikompostování a kompostování v laboratorních

podmínkách po dobu pěti měsíců. Největší množství přístupného hořčíku měl vermikompost s čistírenským kalem a zahradním odpadem, přístupné množství hořčíku bylo 84 % z celkového množství. Přístupné množství draslíku bylo zjištěno ve vermikompostu se směsí digestátu a slámy, přístupné množství draslíku bylo 73 % z celkového množství. Nejvyšší přístupné množství fosforu bylo zjištěno ve vermikompostu s digestátem a slámou, přístupné množství fosforu bylo 15 % z celkového množství. Vermikomposty měly dobré agrochemické vlastnosti a byly kvalitnější než klasické komposty. Zkoumané vermikompostovací zakládky měly podobné hodnoty, ale měly menší množství přístupného draslíku. Může to být způsobeno druhem materiálu nebo velikostí částic materiálu.

Podle zjištěných parametrů pro hodnocení lze posoudit materiál, který prošel vermikompostováním jako vhodný pro další využití. U většiny parametrů splňují vermikompostovací zakládky normu pro kvalitní vermikomposty. Jediný parametr, který nedosahoval optimálního množství podle normy byl celkový obsah draslíku. Podle normy má být minimálně 0,42 %.

Vyhláška č. 312/2021 o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdější předpisů popisuje materiály, které lze zařadit do kategorie typových hnojiv. Ve vyhlášce nejsou zařazeny odpady ve zkoumaných zakládkách, proto by se musely zařadit pod netypová hnojiva.

Některé parametry neodpovídaly předpokládaným výsledkům vermikompostování namíchaných směsí. Důvodem může být stejné stáří namíchané směsi a ponechání v hale, kde docházelo pomalu k rozkladným procesům před přidáním na vermikompostované zakládky. Výsledky v diskuzi a závěru byly použity pouze z nejstarších vrstev zakládek, jelikož v nejstarších vrstvách nedocházelo k biologickému rozkladu na předkompostovaných hromadách. Namíchané směsi se nacházely po celou dobu výzkumu na stejném místě a mohlo dojít k nárůstu teploty. Pro další výzkumy je vhodné vybrat lepší podmínky než v terénu a zajistit stejnou směs po celou dobu procesu.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo ověřit tři hypotézy zabývající se vermikompostováním s nasávanou kartonáží a čistírenskými kaly. Jedna hypotéza se nepotvrdila a dvě hypotézy byly potvrzeny.

1. Hypotéza: Budou nalezeny statisticky významné rozdíly základních fyzikálně chemických vlastností ve vrstvách různého stáří. První hypotéza byla potvrzena, protože byly nalezeny statisticky významné rozdíly ve vrstvách v každé zakládce. V první vermikompostovací zakládce byly nalezeny rozdíly v každém parametru. Jednalo se o obsah sušiny, vlhkosti, pH, elektrické vodivosti a poměru C:N. Nejčastěji byl rozdíl mezi první vrstvou a pátou nebo šestou vrstvou. Obsah sušiny se snížil z první vrstvy do šesté o 22,45 %. Vlhkost se zvýšila o 9,14 % do šesté vrstvy. Mezi první a pátou vrstvou se snížilo pH o 7 %. Vodivost vzrostla do páté vrstvy o 173,43 % a poměr C:N klesl o 14,19 % do šesté vrstvy. Ve druhé vermikompostovací zakládce byly vyhodnoceny rozdíly u všech parametrů. Významný rozdíl v sušině byl mezi druhou a šestou vrstvou o 27,22 %. Ve vlhkosti byl nalezen rozdíl mezi druhou a šestou vrstvou o 9,42 %. Hodnota pH se zvýšila od třetí vrstvy do šesté o 6,44 %. Elektrická vodivost vzrostla mezi první a šestou vrstvou o 132,60 %. Poměr C:N se snížil z první do šesté vrstvy o 29,96 %. U kontrolních zakládek byly opět nalezeny rozdíly v různých parametrech. Významné rozdíly v jednotlivých vrstvách byly nalezeny pomocí statistického šetření.

2. Hypotéza: Vyšší počet žížal a větší množství biomasy bude nalezen v mladších vrstvách. Tato hypotéza byla s jistotou potvrzena. Vyšší počet žížal byl zaznamenán v mladších vrstvách u obou vermikompostovaných zakládek. První vermikompostovací zakládka měla vyšší počet žížal než druhá. V první vermikompostovací zakládce došlo ke zvýšení počtu žížal od první do šesté vrstvy o 541 %. Ve druhé vermikompostovací zakládce bylo množství vyšší od první do šesté vrstvy o 406 %. Vyšší množství biomasy bylo nalezeno v mladších vrstvách. Vyšší hodnoty biomasy měla první vermikompostovací zakládka, stejně jako v předchozím případě. Biomasa se zvýšila o 1786 % mezi první a šestou vrstvou v první vermikompostovací zakládce. Ve druhé vermikompostovací zakládce se zvýšila biomasa od první vrstvy do šesté vrstvy o 978 %.

3. Hypotéza: Nebudou nalezeny rozdíly v parametrech mezi 2 použitými kaly. Toto tvrzení bylo vyvráceno podle zjištěných hodnot ve vstupních surovinách a namíchaných směsí s nasávanou kartonáží. Rozdíly byly nalezeny v sušině, vlhkosti, pH, elektrické vodivosti a poměru C:N. Sušina v prvním kalu byla o 15 % vyšší než ve druhém kalu. Obsah vlhkosti byl naměřen nižší v prvním kalu o 5 % než u druhého kalu. Ve druhém kalu bylo pH nižší o 4 % oproti prvnímu kalu. První čistírenský kal měl výrazně vyšší vodivost o 21 % než druhý kal. Poměr C:N byl vyhodnocen vyšší o 8 % v prvním čistírenském kalu.

Po namíchání čistírenských kalů s nasávanou kartonáží vznikly dvě směsi, kde byly monitorovány rozdíly ve fyzikálně-chemických parametrech. Ve vlhkosti byl téměř nepatrný rozdíl. V první směsi byla o 1 % menší vlhkost než ve druhé směsi. V hodnotě pH byl také naměřen minimální rozdíl mezi dvěma vzorky. Hodnota pH byla vyšší ve druhé směsi pouze o 1 %, což je v rozmezí analytické chyby. Výraznější rozdíl byl nalezen v hodnotách elektrické vodivosti. První směs měla vyšší elektrickou vodivost až o 15 % než u druhé směsi. Poměr C:N byl také výrazný mezi zkoumanými vzorky. C:N bylo vyšší v první směsi o 30 % oproti druhé směsi.

Vermikompost s první směsí měl vyšší hodnoty makroprvků a obsah sušiny než druhý. Druhý vermikompost měl vyšší obsah celkového a přístupného draslíku než první. První

vermikompostovací zakládka měla vyšší snížení C:N a elektrické vodivosti než druhá vermikompostovací zakládka.

Výzkum přinesl dobré zjištění ohledně krmného materiálu pro žížaly, jejichž počet se výrazně zvýšil a v dostupnosti prvků, které byly nižší před pokusem vermikompostování. Pro budoucí výzkumy by bylo dobré zkoumat materiály v laboratorních podmínkách, za účelem vyhodnocení přesnějších výsledků vermikompostování. Dále je vhodné zajistit větší množství opakování u zkoumaných materiálů. Podle zjištěných výsledků lze soudit, že namíchaný materiál je vhodný pro konzumaci žížalami a pro biologické zpracování pomocí vermikompostování. Vermikompostování může být způsob zpracování nasávané kartonáže a kalů. Dle dnešní legislativy lze obaly z papíru zpracovávat jen vermikompostováním. V klasickém kompostování nebyl tento odpad povolen.

8 Literatura

- Ali U, Sajid N, Khalid A, Riaz L, Rabbani MM, Syed JH, Malik RN. 2015. A review on vermicomposting of organic wastes. *Environmental Progress*. 34 (4): 205-211.
- Alshehrei F, Ameen F. 2021. Vermicomposting: A management tool to mitigate solid waste. *Saudi Journal of Biological Sciences*. **28**(6): 3284-3293.
- Amouei AI, Yousefi Z, Khosravi T. 2017. Comparison of vermicompost characteristics produced from sewage sludge of wood and paper industry and household solid wastes. *Journal of Environmental Health Science* **15**: 1-6.
- Ananthanarayanan Y, Ramasundaram T, Balasubramani R, Soon WCh, Natchimuthu K. 2021. Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology e A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability. *Environmental pollution*. **268**: 1-13.
- Arancon NQ, Lee S, Edwards CA, Atiyeh R. 2003. Effects of humic acids derived from cattle, food and paper-waste vermicomposts on growth of greenhouse plants. *Pedobiologia-International Journal of Soil Biology*. **47**(5): 741-744.
- Awasthi MK, Zengqiang Z, Ashok P. 2022. Current developments in biotechnology and bioengineering: Advances in composting and vermicomposting technology. Elsevier, India.
- Basheer M, Agrawal OP. 2016. Vermicomposting of paper waste and effect of additives. LAP LAMBERT Academic Publishing, Mauritius.
- Collivignarelli MC, Canato M, Abbà A, Carnevale MM. 2019. Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*. **238**: 1-21.
- ČSN 46 5736. 2018. Vermikomposty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- Dominguez J, Edwards CA, Webster M. 2000. Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia andrei*. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology* **44**(1): 24-32.
- Dusa ME, Vrînceanu N, Negru P, Safta E, Stan V. 2020. Improving sewage sludge compost quality by vermicomposting. *Scientific Papers*. **63**(2): 267-272.
- Edwards CA, Arancon NQ, Sherman RL. 2010. Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management. CRC Press, New York.
- EKO-KOM, a.s. 2007. Eko-komunikace. Available from https://www.ekokom.cz/uploads/attachments/Klienti/Ekomunikace/EKOKOMunikace_03-06.pdf (accessed August 2022).
- EKO-KOM, a.s. 2022. Papír a NK. Jaktřidit.cz. Available from <https://www.jaktridit.cz/cz/trideni/kufriky/papir-a-nk> (accessed August 2022).
- Elvira C, Sampedro L, Benitez E, Nogales R. 1998. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: a pilot-scale study. *Bioresource Technology* (United Kingdom). **63** (3): 205-211.
- Frederickson J, Howell G, Hobson AM. 2007. Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics. *European Journal of Soil Biology*. **43**(1): 320-326.

- GajaJakshmi S, Ramasamy EV, Abbasi SA. 2002. Vermicomposting of paper waste with the anecic earthworm *Lampito mauritii* Kinberg. *Indian Journal of Chemical Technology*. **9**: 306-311.
- Ganguly RK, Chakraborty SK. 2019. Assessment of qualitative enrichment of organic paper mill wastes through vermicomposting: humification factor and time of maturity. *Heliyon*. **5**(5): 1-8.
- Garg VK, Yadav A. 2011. Industrial wastes and sludges management by vermicomposting. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. **10**(3): 243-276.
- Ghorbani M, Sabour MR. 2021. Global trends and characteristics of vermicompost research over the past 24 years. *Environmental Science and Pollution Research*. **28** (1) 94-102.
- Godlewska P, Joško I, Oleszczuk P. 2022. Ecotoxicity of sewage sludge- or sewage sludge/willow-derived biochar-amended soil. *Environmental Pollution*. **305**: 1-9.
- Greenloop. cz. 2018. Vše o kalifornských žížalách. Available from <https://www.greenloop.cz/blog/o-kalifornskych-zizalach/> (accessed August 2022).
- Gupta R, Garg VK. 2009. Vermiremediation and nutrient recovery of non-recyclable paper waste employing *Eisenia fetida*. *Journal of Hazardous Materials*. **162**(1): 430-439.
- Guzman GMAL, Udtojan MAA, De Castillo MF, Espiritu EQ, Estiva JAN, Unson JRS, Dumo JRE, Espinas JRE. 2020. Efficiency of Combined Co-composting, Vermicomposting, and Drying in the Treatment of Cadmium, Mercury, Helminths, and Coliforms in Sludge from Wastewater Facilities for Potential Agricultural Applications. *Philippine Journal of Science*. **149**(1): 205-214.
- Hanč A, Dreslová M. 2016. Effect of composting and vermicomposting on properties of particle size fractions. *Bioresource Technology*. **217**: 186-189.
- Hanč A, Plíva P. 2013. Vermicomposting technology as a tool for nutrient recovery from kitchen bio-waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. **15**(4): 431-439.
- Cho BU, Ryu JY, Song BK. 2009. Factors influencing deflaking kinetics in repulping to produce molded pulp. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. **15**(1): 119-123.
- Jiacong L, Shuai Z, Qiaoxia Y, Qinjing L, Mingyang L, Yuanfan W. 2021. Rapidly Separating Earthworm from Vermicompost Using Two-Step Technology. *Waste and Biomass Valorization*. **12**(2):757-771.
- Kalina M. 2004. *Kompostování a péče o půdu*. Grada Publishing, Praha.
- Karmakar S, Brahmachari K, Gangopadhyay A, Choudhury SR. 2012. Recycling of Different Available Organic Wastes through Vermicomposting. *E-Journal of Chemistry*. **9**(2): 801-806.
- Karmegam N, Vijayan P, Prakash M, Arockia JP. 2019. Vermicomposting of paper industry sludge with cowdung and green manure plants using *Eisenia fetida*: A viable option for cleaner and enriched vermicompost production. *Journal of Cleaner Production*. **228**: 718-728.
- Khwairakpam M, Bhargava R. 2009. Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous Materials*. **161**(2): 948-954.
- Knight D. 1989. Nice work for a worm. *New Scientist*. **123**(1672): 55-59.
- Kocman JH. 2011. *Médium papír. Vysoké učení technické v Brně*, Brno.

- Kulikowska D, Bernat K, Zaborowska M, Zielińska M. 2022. Municipal Sewage Sludge Composting in the Two-Stage System: The Role of Different Bulking Agents and Amendments. *Energies*. **15**: 5014-5028.
- Lešíkar M, Tymich J, Procházka O. 2012. Papír. Odpadové fórum: **11**: 10-14.
- Li W, Wang C, Sun Z. 2011. Vermipharmaceuticals and active proteins isolated from earthworms. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology*. **54**: 549-556.
- Liu F, Zhu P, Xue J. 2012. Comparative Study on Physical and Chemical Characteristics of Sludge Vermicomposted by *Eisenia Fetida*. *Procedia Environmental Sciences*. **16**: 418-423.
- Martínez KYP, Toso EAV, Morabito R. 2016. Production planning in the molded pulp packaging industry. *Computers & Industrial Engineering*. **98**: 554-566.
- Ministerstvo zemědělství. 2021. Vyhláška č. 312 ze dne 27. srpna 2021, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů. Pages 3586-3631 in *Sbírka zákonů České republiky, 2021, částka 137*. Česká republika.
- Ministerstvo životního prostředí. 2021. Vyhláška č. 273 ze 7. srpna 2021, která stanovuje podrobnosti nakládání s odpady. Pages 16-17 in *Sbírka zákonů České republiky*. Česká republika.
- Mohrmann P. 2022. Seriál o kalech II: Jak s nimi nakládáme v současné době. Available from <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/serial-o-kalech-ii-jak-s-nimi-nakladame-v-soucasne-dobe> (accessed December 2022).
- Monroy F, Aira M, Domínguez J. 2008. Changes in density of nematodes, protozoa and total coliforms after transit through the gut of four epigeic earthworms (*Oligochaeta*). *Applied Soil Ecology*. **39**: 127-132.
- Mupondi LT, Mkeni PNS, Muchaonyerwa P. 2010. Effectiveness of combined thermophilic composting and vermicomposting on biodegradation and sanitization of mixtures of dairy manure and waste paper. *African Journal of Biotechnology*. **9**(30): 4754-4763.
- Ndegwa PM, Thompson SA. 2001. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids. *Bioresource Technology*. **76**(2): 107-112.
- Novopol s.r.o. 2022. Pěnový polystyren a nasávaná kartonáž. Available from <https://www.novopol.cz/nk.html>
- Obal centrum s.r.o. 2022. Nasávaná kartonáž. Available from <https://www.obalcentrum.cz/nasavana-kartonaz> (accessed August 2022).
- Plíva P, Altmann V, Habart J, Jelínek A, Kollárová M, Marešová K, Míra M, Váňa J, Vostoupal B. 2009. Kompostování v pásových hromadách na volné ploše. Vydavatelství Profi press, Praha.
- Plíva P, Altmann V, Hanč A, Hejátková K, Roy A, Souček J, Valentová L. 2016. Kompostování a kompostárny. Vydavatelství Profi Press, Praha.
- Przemieniecki SW, Zapalowska A, Skwiercz A, Damszel M, Telesiński A, Sierota Z, Gorczyca A. 2021. An evaluation of selected chemical, biochemical, and biological parameters of soil enriched with vermicompost. *Environmental Science and Pollution Research*. **28** (7): 8117-8127.

- Ravindran B, Mnkeni PN. 2016. Bio-optimization of the carbon-to-nitrogen ratio for efficient vermicomposting of chicken manure and waste paper using *Eisenia fetida*. Environmental science and pollution research international **23**(17): 16965-76.
- Roubalová R, Procházková P, Hanč A, Dvořák J, Bilej M. 2020. Mutual interactions of *E. andrei* earthworm and pathogens during the process of vermicomposting. Environmental Science and Pollution Research. **27**: 33429-33437.
- Sarker MMH, Kashem MA. 2020. Earthworm species and their feeding substances have great role on the quantity and quality of produced vermicompost. Organic Agriculture: Official journal of The International Society of Organic Agriculture Research. **10**(4): 437-448.
- Sonowal P, Dhamodharan K, Khwairkham M. 2013. Feasibility of vermicomposting dewatered sludge from paper mills using *Perionyx excavatus*. European Journal of Environmental Sciences. **3**(1): 17-26.
- Sukru TA. 2021. Change of physicochemical properties and heavy metals content in sewage sludge during its vermicomposting with *Eisenia fetida*. Environment Protection Engineering. **47**: 17-28.
- Suthar S. 2010. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology. Ecological Engineering. **36**(8): 1028-1036.
- Tauseef SM, Tabassum-Abbasi, Patnaik P, Abbasi T, Abbasi SA. 2021. A novel high-rate vermicomposting machine for downstream processing of biorefinery waste and other forms of organic solid waste. Biomass Conversion and Biorefinery: Processing of Biogenic Material for Energy and Chemistry. 1-10.
- Vuković A, Velki M, Ečimović S, Vuković R, Lončarić Z. 2021. Vermicomposting—Facts, Benefits and Knowledge Gaps. Agronomy. **11**(10): 1952-1967.
- Yadav A, Garg VK. 2011. Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. Bioresource Technology. **102**(3): 2874-2880.
- Yilmaz CRG, Agdag ON. 2020. Co-vermicomposting of Wastewater Treatment Plant Sludge and Yard Waste: Investigation of Operation Parameters. Waste and Biomass Valorization. **11**(11): 6211-6222.
- Zajonc I. 1992. Chov žížal a výroba vermikompostu. Animapress, Dunajská Streda.
- Zhang Y, Duan C, Bokka SK, He Z, Ni Y. 2022. Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review. Journal of Bioresources and Bioproducts. **7**(1): 14-25.

9 Samostatné přílohy



Příloha č. 1: Namíchání kalu č. 1 a kartonáže (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 2: Namíchání kalu č. 2 a kartonáže (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 3: Zakládání první vrstvy (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 4: První krmení žížal (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 5: Fotka kalu č.1 (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 6: Fotka kalu č.2 (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 7: Nasávaná kartonáž (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 8: Kontrolní zakládka (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 9: Poslední přidání vrstvy na vermikompost (foto Milan Hrčka)



Příloha č. 10: Ukončení pokusu vermikompostování (foto Milan Hrčka)