

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vermikompostování předkompostovaného  
čistírenského kalu**

**Diplomová práce**

**Autor práce Bc. Bronislava Říhová  
Obor studia Technologie odpadů**

**Vedoucí práce Ing. Aleš Hanč, Ph.D.**

**© 2021 ČZU v Praze**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vermikompostování předkompostovaného čistírenského kalu" jsem vypracovala 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25.4.2021

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Aleši Hančovi, Ph.D za cenné rady, pomoc a odborný dohled při zpracování diplomové práce. Mé poděkování patří též všem kolegům z Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, kteří mi věnovali svůj čas pro konzultace a při měření výsledků praktické části diplomové práce. V neposlední řadě, bych ráda poděkovala své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili, a bez jejich pomoci by nebylo možné práci dokončit. 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 předkompostovaného čistírenského kalu

## Souhrn

Kal z čistíren odpadních vod (ČOV) může být při správné úpravě cennou surovinou pro aplikaci na zemědělskou půdu. Obsahuje živiny i látky zlepšující kvalitu půdy. V této práci byl v průběhu 14 dnů předkompostován (PK) a následně během 4 měsíců vermikompostován (VK) kal (K) z ČOV ve směsi se slaměnými peletami (SP) v poměru K:SP. Jednalo se o varianty 4:0; 3:1; 2:2; 1:3 a 0:4. PK probíhalo v aerobních fermentorech. VK ve vermikompostovacích boxech z předkompostovaného materiálu. Cílem práce bylo posoudit vliv přídatku pelet na efektivitu VK předkompostovaného kalu a sledovat účinnost PK a VK.

U PK a v průběhu VK bylo stanovováno pH, elektrická vodivost (EC), celkový obsah C v % a Ca, K, Mg a P v mg/kg sušiny a také přístupný obsah prvků v roztoku CAT. U PK se sledovala teplota. U VK probíhal průzkum vývoje populace žížal v čase.

Statistické šetření neprokázalo průkazné rozdíly mezi průměrnými teplotami variant 0:4 a 1:3. Průměrná teplota těchto variant se pohybovala mezi 48 a 51 °C. Tím pádem byla zamítnuta hypotéza o nejvyšší průměrné teplotě v termofilní fázi PK ve variantě 0:4. Bylo potvrzeno, že s narůstajícím množstvím slaměných byly nalezeny statisticky průkazné rozdíly mezi variantami 4:0, 3:1, 2:2 vůči variantám 0:4.

pH bylo na konci VK ve 4 variantách z 5 kyselé. Nejnižší bylo u varianty 3:1 a to 5,18. Celkový obsah C nejvíce klesl také ve variantě 3:1 a to o 6,52 %. Celkový obsah Ca a Mg v sušině byl největší u 1:3. Přístupný obsah Mg nejvíce narostl u 4:0 o 26 %, u varianty 1:3 o 1,7 %. Maximální celkový obsah K byl ve variantě 0:4, ale přístupný obsah ve variantě 4:0 narostl o více než 14 %. U varianty 0:4 dokonce přístupný obsah prvku klesl o 40 %. Naopak celkový obsah P byl maximální u 3:1. Přístupný obsah dosáhl svého maxima u varianty 1:3 a zvýšil se o 7,8 % u varianty 0:4 došlo opět k poklesu dostupnosti o 17,3 %. Nevyšší hmotnost (39,1 g) a počet žížal (164 ks) v 1 kg vermikompostu bylo ve variantě 3:1 po dvou měsících VK. Ve variantě 0:4 hmotnost a počet žížal s časem narůstal.

Na závěr práce byl doporučen další výzkum s většími objemy materiálů v průmyslovém měřítku a sledování nejenom fyzikálně-chemických parametrů, ale také vliv vermikompostů na rostliny při aplikaci na zemědělskou půdu.

**Klíčová slova:** předkompostování, vermikompostování, kal z čistírny odpadních vod, vermikompost, zemědělství

# Vermicomposting of pre-composted sewage sludge

## Summary

Sewage sludge (SS) can be a valuable raw material for application to agricultural land. SS contains nutrients and substances that improve soil quality. In this thesis, was sludge mixture with straw pellets (SP) in various ratios of SS:SP. Precomposting (PC) of the materials lasted 14 days, followed by vermicomposting (VC) for 4 months. These were variants 4:0; 3:1; 2:2; 1:3 and 0:4. PC was in aerobic fermenters. VC in vermicompostingboxes with precomposted materials. The aim of the thesis was to assess the effect of the addition of straw pellets and the efficiency of VC precomposted sludge and to monitor the efficiency of PC and VC.

The pH, electrical conductivity, the total carbon in % and calcium, potassium, magnesium, and phosphorus in mg/kg dry material in the precomposts and, as well as the accessible content of elements in the CAT. The temperature of the PC was monitored. A survey of the development of the earthworm population over time was carried out at VC. The statistical survey did not show significant differences between the average temperatures of the 0:4 and 1:3 variants. The average temperatures of these variants ranged between 48 and 51 °C. The hypothesis of the highest average temperature in the thermophilic phase of PK in the 0:4 variant was rejected. It was confirmed that with increasing of straw pellets, statistically significant differences were between variants 4:0, 3:1, 2:2 compared to 0:4.

The pH was acidic at the end of VC in 4 variants out of 5. The lowest was in the 3:1, namely 5.18. The total carbon content also decreased the most in the 3:1 variants by 6.52 %. The total content of calcium and magnesium in the dry material was the highest at 1:3. The accessible magnesium increases the most at 4:0 by 26 %, at variant 1:3 by 1.7 %. The maximum total potassium was in the 0:4 the variant, but the available content in the 4:0 variant increased by more than 14 %. In the 0:4 variant, even the accessible element content decreased by 40 %. In contrast, the total phosphorus was maximal at 3:1. The available phosphorus reached the maximum in the 1:3 variant and increased by 7.8 %, and in the 0:4 variant the availability decreased by 17.3 %. The highest weight of 39.1 and the number of earthworms 164 pieces in 1 kg of vermicompost was in the 3:1 variant after two months of VC. In the 0:4 variant, the weight and number of earthworms increased over time. At the end of the work, further research with larger volumes of materials on an industrial-scale was recommended and to monitor not only physicochemical parameters, but also the effect of vermicompost on plants when will be applied to the soil.

**Keywords:** precomposting, vermicomposting, sewage sludge, vermicompost, agriculture

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Úvod .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2 Vědecká hypotéza a cíle práce .....</b>                       | <b>10</b> |
| <b>3 Přehled literatury .....</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>3.1 Kalové hospodářství.....</b>                                | <b>11</b> |
| 3.1.1 Kalové hospodářství v ČR.....                                | 11        |
| 3.1.2 Kalové hospodářství ve světě .....                           | 12        |
| <b>3.2 Čistírenský kal jako hnojivo v zemědělství.....</b>         | <b>13</b> |
| 3.2.1 Legislativa.....   | 13        |
| 3.2.2 Vliv na zemědělskou půdu.....                                | 14        |
| <b>3.3 Kompostování.....</b>                                       | <b>15</b> |
| 3.3.1 Podmínky kompostování .....                                  | 16        |
| 3.3.1.1 Hodnota pH .....   | 16        |
| 3.3.1.2 Materiálové zastoupení živin.....                          | 16        |
| 3.3.1.3 Obsah kyslíku .....  | 17        |
| 3.3.1.4 Teplota a hygienizace .....                                | 17        |
| 3.3.1.5 Vlhkost .....  | 18        |
| 3.3.2 Doba kompostování .....                                      | 19        |
| 3.3.3 Jakost kompostu.....   | 19        |
| 3.3.4 Studie týkající se kompostování .....                        | 20        |
| 3.3.5 Výhody kompostu.....   | 21        |
| 3.3.6 Nevýhody kompostu.....                                       | 21        |
| <b>3.4 Vermikompostování.....</b>                                  | <b>22</b> |
| 3.4.1 Podmínky vermikompostování .....                             | 22        |
| 3.4.1.1 Hodnota pH .....   | 23        |
| 3.4.1.2 Obsah kyslíku .....  | 23        |
| 3.4.1.3 Teplota.....   | 23        |
| 3.4.1.4 Vlhkost .....  | 23        |
| 3.4.1.5 Rizikové faktory .....                                     | 23        |
| 3.4.2 Hygienizace vermikompostu .....                              | 24        |
| 3.4.3 Složení vermikompostu .....                                  | 24        |
| <b>3.5 Porovnání systémů kompostování a vermikompostovní .....</b> | <b>25</b> |
| <b>4 Materiál a metody .....</b>                                   | <b>30</b> |
| <b>4.1 Přípravné práce.....</b>                                    | <b>30</b> |
| <b>4.2 Suroviny .....</b>  | <b>31</b> |
| <b>4.3 Předkompostování .....</b>                                  | <b>32</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.4</b> | <b>Vermikompostování.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Odběr a úprava vzorků .....</b>  | <b>33</b> |
| 4.5.1      | Předkompostování odběr vzorků .....   | 33        |
| 4.5.1.1    | Odběr 5.3.2020 – začátek předkompostování .....                                       | 33        |
| 4.5.1.2    | Odběr 18.3.2020 – ukončení předkompostování.....                                      | 33        |
| 4.5.2      | Vermikompostování odběr vzorků .....  | 34        |
| 4.5.2.1    | Odběr vzorku 18.3.2020 – začátek vermikompostování.....                               | 34        |
| 4.5.2.2    | Odběr duben, květen, červen – průběh vermikompostování.....                           | 34        |
| 4.5.2.3    | Odběr červenec 17.3.2020 – ukončení vermikompostování .....                           | 35        |
| 4.5.2.4    | Oddělování žížal .....  | 35        |
| 4.5.3      | Sušení vzorků.....  | 37        |
| <b>4.6</b> | <b>Hodnocené parametry .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Laboratorní analýzy.....</b>   | <b>38</b> |
| 4.7.1      | Stanovení pH a elektrické vodivosti .....   | 38        |
| 4.7.2      | Metoda suchého rozkladu pro stanovení celkových obsahů makroprvků                     | 38        |
| 4.7.3      | Metoda CAT pro stanovení přístupného obsahu prvků .....                               | 39        |
| 4.7.4      | Metoda prvkové elementární analýzy.....   | 40        |
| 4.7.5      | Statistické vyhodnocení dat .....   | 40        |
| 4.7.6      | Značení vyhodnocených dat .....   | 41        |
| <b>5</b>   | <b>Výsledky.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Předkompostovní.....</b>   | <b>42</b> |
| 5.1.1      | Teplota .....   | 42        |
| 5.1.1.1    | Statistické šetření.....  | 43        |
| <b>5.2</b> | <b>Změna agrochemických parametrů během předkompostování a vermikompostování.....</b> | <b>45</b> |
| 5.2.1      | pH.....   | 45        |
| 5.2.2      | Elektrická vodivost .....   | 47        |
| 5.2.3      | Uhlík (C).....  | 48        |
| 5.2.4      | Poměr uhlíku a dusíku (C:N).....  | 49        |
| 5.2.5      | Makroživiny.....  | 50        |
| 5.2.5.1    | Vápník (Ca) .....   | 50        |
| 5.2.5.2    | Draslík (K).....  | 51        |
| 5.2.5.3    | Hořčík (Mg).....  | 53        |
| 5.2.5.4    | Fosfor (P).....   | 55        |
| <b>5.3</b> | <b>Vermikompostování.....</b>   | <b>57</b> |
| 5.3.1      | Vývoj hmotnosti vlhkého materiálu během vermikompostování.....                        | 57        |
| 5.3.2      | Vývoj biomasy žížal ve vermikompostu .....  | 57        |
| 5.3.2.1    | Statistické šetření.....  | 58        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>6</b>  | <b>Diskuze .....</b>  | <b>60</b> |
| 6.1       | Teploty během předkompostování .....  | 60        |
| 6.2       | Změna agrochemických parametrů během předkompostování a<br>vermikompostování..... | 61        |
| 6.3       | Nárůst biomasy žížal v čase.....  | 63        |
| <b>7</b>  | <b>Závěr .....</b>  | <b>65</b> |
| <b>8</b>  | <b>Seznam literatury .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>9</b>  | <b>Seznam grafů, obrázků a tabulek.....</b>                                       | <b>70</b> |
| <b>10</b> | <b>Samostatné přílohy .....</b>   | <b>I</b>  |



# 1 Úvod

Voda je základem života a využívání vody v domácnostech je znak moderní civilizace. Odpadní voda je shromažďována pomocí složitých kanalizačních systémů a dopravována mimo husté osídlení pro další úpravu a čištění. Rozšíření a modernizace čistíren odpadních vod je jediným způsobem, jak snížit znečištění a omezit poškozování povrchových a podzemních vod. Současné technologie vedou ke vzniku druhotného odpadu ve formě kalu, který může být zdrojem minerálních látek, ale také znečištěním (Sava et al. 2019).

Při využívání zemědělské půdy je potřeba pečovat o kvalitu půdy a dodávat do ní potřebné živiny a látky. Dále je nutné dodržovat pravidla správné zemědělské praxe jako například osevnické postupy. Bez půdních mikroorganismů by se půda stala mrtvou a nemohla sloužit k zemědělským účelům. Změnily by se její vlastnosti a snadno by docházelo k erozi.

Je tedy důležité zajistit rovnováhu mezi produkcí na zemědělské půdě a hnojením dostatečně obohacujícími látkami (Hanc et al. 2020; FAO & ITPS 2015). Kaly z čistíren odpadních vod (ČOV) se v zemědělství používají jako půdní kondicionéry (G. Guzman et al. 2020). Za správných podmínek má kal pozitivní přínos na kvalitu půdy, ale jsou zde také rizika spojená s užitím kalu. Mohou se v něm vyskytovat těžké kovy, toxické látky a patogenní mikroorganismy. Tyto problémy poukazují na potřebu dalších důkladných zkoumání a pochopení podstaty kalu i hledání bezpečného využití v zemědělství (G. Guzman et al. 2020).

V roce 2018 byla celková produkce kalu 202 358 tun sušiny (Wanner 2019). Producentem takového kalu jsou čistírny odpadních vod, které disponují různými technologiemi a na základě přijímané odpadní vody, každý kal z každé čistírny odpadních vod může mít odlišné vlastnosti. ČOV využívají dostupné technologie ke snižování množství kalu z procesu čištění odpadní vody (OV) (Ministerstvo životního prostředí).

Jednou z možností úpravy kalu z ČOV je kompostování (Koyama et al. 2018). Alternativou je vermikompostování, kde při biooxidaci a stabilizaci organické hmoty nedojde k termofilní fázi. Společně s mikroorganismy mají rozhodující vliv na stabilizaci, degradaci a provzdušnění žížaly (Hanc et al. 2020).

## 2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Pro účel diplomové práce byly využity různé metody sledování a sbírání dat při předkompostování a vermikompostování kalů z ČOV. Sledovaly se fyzikálně-chemické vlastnosti a změny při předkompostování a vermikompostování. Dále se posuzovalo přežití a vývoj žížal při vermikompostování. Jednotlivé varianty byly vždy kombinací různých poměrů kalu a slaměných pelet.

Hypotézy:

1. nejvyšší teplota v termofilní fázi předkompostování bude u varianty se samotnými peletami,
2. větší změna agrochemických parametrů bude během předkompostování než během vermikompostování,
3. přídavek slaměných pelet bude mít pozitivní vliv na nárůst počtu a biomasy žížal během následného vermikompostování.

Cílem práce je posoudit vliv přídavku pelet na efektivitu vermikompostování předkompostovaného čistírenského kalu. Předložená diplomová práce zkoumá efektivitu fází předkompostování a vermikompostování kalů z čistírny odpadních vod.

### 3 Přehled literatury

Kompostování a vermikompostování jsou dva z neznámějších způsobů biologické stabilizace pevných organických odpadů (Lung et al. 2001).

Kombinované zpracování biomasy kompostováním a vermikompostováním je účinnější z hlediska stabilizace. Žížaly v materiálu také podporují retenci dusíku a postupné uvolňování fosforu, stejně jako zvýšení elektrické vodivosti (EC), čímž se vytvoří vylepšené substráty pro zemědělské využití. Doba trvání procesů se odvíjí od podmínek kompostování a od charakteru vstupních materiálů (Lazcano et al. 2008).

Při kompostování, vermikompostování nebo kombinovaném procesu nesmí dojít k ohrožení životního prostředí (ŽP). Těmito metodami lze zpracovat různé druhy bioodpadu včetně kalů z čistíren odpadních vod. Velkoprodukční kompostování a vermikompostování by se mělo provádět na vodohospodářsky zabezpečených plochách. Podmínky jsou upraveny v zákoně č. 541/2020 Sb. o odpadech a v zákoně č. 254/2001 Sb. o vodách.

#### 3.1 Kalové hospodářství

Zpracování odpadních vod (OV) má za cíl odstranit nežádoucí složky obsažené v odpadní vodě a koncentrovat je do kalu, který lze z OV vyseparovat. Kal může také obsahovat přebytečnou biomasu z biologického čištění OV (Ministerstvo životního prostředí).

##### 3.1.1 Kalové hospodářství v ČR

Odpadní kal vzniká při čištění odpadních vod a je nevyhnutelným produktem vznikajícím při tomto procesu. Kal je nutné dále upravit nebo vhodně odstranit, aby se zabránilo nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví. Kvalita kalu se odvíjí od koncentrací jednotlivých znečišťujících látek, charakteru odpadní vody a úrovně použité technologie a požadavků na kvalitu vyčištěné odpadní vody (Ministerstvo životního prostředí).

Kal se odděluje z odpadní vody nejčastěji sedimentací a následným odčerpáním. Tento druh separace různých druhů kalů v průběhu čištění odpadních vod nezabrání ani neeliminuje toxiny a další znečišťující látky v odpadní vodě. To znamená, že se kontaminující látky mohou stále vyskytovat ve vyčištěné vodě nebo dostat do prostředí společně s kalem (Wroble 2020).

Kal lze charakterizovat podle zákona o odpadech č. 541/2020 Sb. jako kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají OV stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností, a to i v případě, že čistírny odpadních vod zpracovávají také biologicky rozložitelný odpad na základě povolení provozu zařízení podle § 21 odst. 2 nebo biologicky rozložitelný odpad spadající do působnosti nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009.

Kaly z ČOV musí být využity nebo zpracovány, aby to bylo přijatelné pro ŽP, udržitelné a ekonomicky únosné. Ministerstvo životního prostředí České republiky uvádí, že kalové hospodářství jako samostatný proces v ČOV zaujímá zhruba polovinu celkových nákladů na čištění odpadních vod (Ministerstvo životního prostředí).

Šetrná a ekonomická forma využití upraveného kalu, jako pevného odpadu je ukládání na zemědělskou půdu. Aplikace kalu je omezena vlastnostmi kalu a látkami obsažených v materiálu (G. Guzman et al. 2020).

Upraveným kalem se rozumí kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalu, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací na zemědělskou půdu. Je nutné ověřit účinnost technologie úpravy kalů, proto musí být vypracován program použití kalů. Popřípadě lze aplikovat kal, který splňuje mikrobiologická kritéria stanovená vyhláškou ministerstva životního prostředí (Zákon č. 541/2020 Sb.).

Upravený kal je zařazen mezi ostatní odpady. S neupraveným kalem musí být nakládáno s ohledem na zdravotní rizika, která představuje. Úprava kalu smí probíhat pouze v čistírnách OV nebo v zařízeních určených k úpravě kalů, tím může být například kompostárna (Zákon č. 541/2020 Sb.).

Tabulka 1 prezentuje způsoby nakládání s čistírenským kalem v ČR v letech 2009 až 2018 v absolutních číslech. Data byla zpracována do studie o nakládání s čistírenskými kaly Sdružením odboru vodovodů a kanalizací ČR. Kategorie označená "Jinak" představuje uložení kalů na skládku ve formě technického zabezpečení skládky. Podle Tabulky 1 jde vidět, že přestože každoročně dochází k nárůstu množství kalu, rozložení mezi jednotlivými způsoby nakládání jsou v průběhu let až na výjimky neměnné (Wanner 2019).

Tabulka 1 - Produkce a nakládání s čistírenskými kaly v ČR v tunách sušiny (Wanner 2019)

| Rok  | Kaly z ČOV celkem | Přímá aplikace a rekultivace | Kompostování | Skládkování | Spalování | Jinak  |
|------|-------------------|------------------------------|--------------|-------------|-----------|--------|
| 2009 | 168 164           | 42 442                       | 80 727       | 5 931       | 2 179     | 36 885 |
| 2010 | 170 689           | 60 639                       | 45 528       | 6 177       | 3 336     | 55 009 |
| 2011 | 163 190           | 61 750                       | 45 985       | 9 527       | 3 538     | 43 018 |
| 2012 | 168 190           | 51 912                       | 53 222       | 9 340       | 3 528     | 50 188 |
| 2013 | 154 274           | 54 713                       | 50 384       | 7 123       | 3 232     | 38 822 |
| 2014 | 159 162           | 47 830                       | 60 511       | 5 236       | 3 400     | 42 185 |
| 2015 | 172 997           | 63 061                       | 67 065       | 6 513       | 2 167     | 34 191 |
| 2016 | 173 709           | 62 551                       | 65 163       | 10 183      | 4 814     | 30 998 |
| 2017 | 178 077           | 75 451                       | 60 930       | 11 809      | 4 736     | 25 151 |
| 2018 | 202 358           | 88 883                       | 64 515       | 17 728      | 19 440    | 11 792 |

### 3.1.2 Kalové hospodářství ve světě

Negativní část kalového hospodářství je způsobena špatným zacházením s odpadními produkty fekálního typu, způsobující nemoci přenášené vodou a znečištění vody. Problematická je skupina 2,4 miliardy lidí na celém světě bez přístupu k sanitárnímu zařízení (Water sanitation hygiene: Key facts from JMP 2015 report: WHO; OSN: Fakta o vodě).

V reakci na nedostatečný přístup k základní hygieně Organizace spojených národů definovala 7 rozvojových cílů. Jeden z nich je např. snížit na polovinu počet lidí, kteří nemají důstojné podmínky pro hygienu (OSN; Fakta o vodě).

Pozitivním příkladem pro nakládání s kalý je Japonsko se 120 miliony obyvatel a 72 % z nich je připojeno ke kanalizační síti, kde dochází k čištění OV pomocí ČOV. Dalších 21 % obyvatel využívá speciální zařízení nainstalované v domácnosti, které shromažďuje kal z černé vody, ten je ztužován a odvážen speciální firmou určenou k likvidaci kalu. Zbývajících 7 % využívá technologie jako septiky a jímky (Harada et al. 2016).

Opačným případem je Čína, která je rychle rozvíjející se stát s vysokým růstem ekonomiky, průmyslu i produkce odpadních vod. S ustavičně se zvyšující produkcí OV se zvyšuje i produkce kalu ročně zhruba o 10 %. V důsledku zpoždění vývoje technologie zneškodňování kalů je velké množství tohoto odpadu dočasně hromaděno na půdních plochách. Ty jsou ohroženy škodlivými látkami konkrétně těžkými kovy, patogeny, parazity a organickým znečištěním. Tento způsob zacházení s kalem přináší Číně problémy z pohledu ekologie životního prostředí, sociálního dopadu a skryté problémy z hlediska bezpečnosti (Chen 2012).

## **3.2 Čistírenský kal jako hnojivo v zemědělství**

Existují zásady pro správnou zemědělskou praxi při používání hnojiv. Ty vycházejí ze souboru doporučení pro používání hnojiv na zemědělské půdě šetrných k ŽP. Tyto zásady mají za cíl zlepšení kvality ŽP.

### **3.2.1 Legislativa**

Z hlediska legislativy je zde směrnice rady ES č.91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů. Směrnice má úzký vztah k zákonu o vodách a hnojivech (Trávník 2020).

Řízené zpracování kalů bude komplexnější, s tím, jak se budou zpřísnovat standardy pro ŽP a pokud se bude novelizovat legislativa spojená s tímto druhem hnojiva. Ukládání neupravených kalů na skládky je v ČR zakázáno. Legislativně byla problematika kalů upravena vyhláškou č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Tato vyhláška byla zrušena novým zákonem k 1.1.2021 zákonem č. 541/2020 Sb. o odpadech (Ministerstvo životního prostředí).

V zákoně o odpadech č. 541/2020 Sb. je přesně specifikována úprava kalů před použitím na zemědělské půdě a povinnosti při používání kalů na zemědělské půdě. Neprovádí-li ČOV sama úpravu kalu musí ho předat oprávněné osobě do zařízení na úpravu kalů. Subjekt, který provede úpravu kalu musí před uložením na zemědělskou půdu vypracovat program použití kalů a nechat ho schválit Ústřednímu kontrolnímu a zkušebnímu ústavu zemědělskému.

Na kal nebo směs kalu s materiálem určeným vyhláškou se vztahují mikrobiální kritéria. Mezní hodnoty rizikových látek jsou stanoveny vyhláškou a musí být ověřeny. Množství aplikovaného kalu se odvíjí od množství rizikových látek a s ohledem na vlastnosti kalu nebo směsi kalu a povolených látek (Zákon č. 541/2020 Sb.).

Povinností subjektu při používání kalů je, že aplikace na zemědělskou půdu nesmí způsobit zhoršení kvality půdy, povrchových a podzemních vod. Je nutné dodržet podmínky stanovené v § 68 zákona o odpadech.

Aplikace upraveného kalu je zakázána na zemědělské půdě, která je součástí chráněné krajinné oblasti, na lesních půdách určených k hospodaření, v ochranných pásmech vodních zdrojů, na zaplavených a zamokřených plochách a na řadě dalších lokalitách viz odstavec 3 § 69 zákona o odpadech č. 541/2020 Sb.

### 3.2.2 Vliv na zemědělskou půdu

Několik studií ukázalo, že kal z čistíren odpadních vod obsahuje sloučeniny bohaté na zdroje organických látek, dále dusík, draslík a fosfor a další živiny důležité pro rostliny (G. Guzman et al. 2020).

V návaznosti na legislativní hledisko k aplikaci kalů z ČOV na zemědělskou půdu je potřeba se blíže podívat i na vědecký výzkum. Studie kvantitativního hodnocení rizik a kvalitativního posouzení rizik spojených s používáním hnoje a čistírenských kalů v dánském zemědělství ukazuje na zajímavé fakty. Kvantitativní hodnocení rizik pro životní prostředí (ERA) je způsob posouzení na základě systematického postupu pro předpovídání potenciálních rizik pro lidské zdraví nebo životní prostředí. Jak organická hnojiva z živočišné produkce, tak čistírenské kaly představují několik rizik pro životní prostředí a lidské zdraví. (Magid et al. 2020).

Kvantitativní hodnocení rizik pro životní prostředí (ERA) byla vyhodnocena odhadem kumulativního rizika 138 kalů a 20 různých prasečích kejdu u kterých byly identifikovány kontaminující látky po 6 měsících po 100 letech od první aplikace. Environmentální riziko bylo kvantifikováno jako poměr předpokládané koncentrace prostředí (PEC) děleno predikovanou koncentrací bez účinku (PNEC). Zjednodušeně řečeno, pokud je poměr PEC / PNEC větší než 1, látka vzbuzuje obavy. Výsledný poměr pro kal z čistíren odpadních vod byl 2–3 a pro prasečí kejdu 8. Těžké kovy především zinek a měď tvořily majoritní zastoupení na tomto výsledku. Tvořily více než 50 % environmentálního rizika při aplikaci prasečí kejdy na zemědělskou půdu. Zatím co ftaláty a  $C_{13}H_9Cl_3N_2O$  (TCC) společně představovaly více než 50 % odpovídajícího rizika u čistírenských kalů. To znamená, že primární zastoupení rizikových látek bylo v kalu i prasečí kejdě rozdílné (Magid et al. 2020).

Dále při porovnávání rizik pro lidské zdraví z hlediska expozice na toxické prvky a farmaka v potravinářských plodinách dospěla studie k závěru, že výsledky nevyvolávají důvod k obavám. Dánský kal z čistíren odpadních vod nepředstavuje vyšší riziko pro půdní mikroorganismy nebo lidské zdraví než prasečí kejda (Magid et al. 2020).

Na základě dalších informací lze o kalu z čistíren odpadních vod prohlásit, že obsahuje dusík, fosfor a prvky podporující používání na zemědělské půdě jako hnojivo. Obsahuje také organické látky a živiny, které mohou pozitivně přispívat ke zvýšení úrodnosti na hnojené půdě (Sava et al. 2019).

Zatím co nevhodné čištění odpadní vody a úpravy kalu mohou vést k tomu, že kal bude obsahovat patogenní mikroorganismy a představovat při aplikaci na zemědělskou půdu riziko újmy na životním prostředí i na lidském zdraví (G. Guzman et al. 2020).

Špatné nakládání s biologicky rozložitelnými látkami umístěnými na zemědělskou půdu má vliv na životní prostředí. Do půdy se mohou vnášet potenciálně škodlivé stopové

prvky, anorganické soli a patogeny. V krajních případech to může vést ke ztrátě živin vyluhováním a erozi (Lazcano et al. 2008).

Konkrétně těžké kovy jsou biologicky nerozložitelné. Při aplikaci na půdu, existují různě citlivé plodiny s odlišnou akumulací rizikového prvku. Obzvláště problematická je aplikace na půdu, která je určená k pěstování rajčat nebo hlávkového salátu. Potravinu akumulují rizikové prvky a mohlo by dojít k přenesení do potravního řetězce. Obecně množství těžkých kovů v půdě významně ovlivňuje celkovou úrodnost (G. Guzman et al. 2020).

Dalším negativem je případné setrvání patogenních mikroorganismů v kalu, které mohou v půdě přežívat dlouho dobu, a tak mohou způsobovat lidem a zvířatům, které s půdou nebo rostlinným produktem přijdou do kontaktu gastrointestinální infekce (Lazcano et al. 2008).

### 3.3 Kompostování

Kompostování je řízený proces přeměny biologicky rozložitelných surovin na stabilizovaný produkt a to kompost. Proces zahrnuje zrychlenou degradaci organické hmoty s využitím mikroorganismů v řízených, aerobních podmínkách (Lung et al. 2001). Kompostování je běžně rozděleno do tří fází. První stupeň je mezofilní fáze, druhý je vysokoteplotní stupeň a třetí stupeň zrání. Mezofilní fáze končí dosažením teploty 45 °C a nastává přechod do termofilní fáze. Pro tu je typická vysoká spotřeba kyslíku, vysoká teplota a rychlost degradace organických látek (Chen 2012). Termofilní fáze umožňuje snížit patogenní mikroorganismy na požadované limity, dojde tak k hygienizaci materiálu (Lung et al. 2001). Fáze dozrání, může trvat i 60 dnů a je charakterizována poklesem teploty pod 40 °C.

Celý proces kompostování lze zjednodušeně vyjádřit obecnou rovnicí:

- organický materiál + O<sub>2</sub> → kompost + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + teplo

Na kvalitu kompostu a jeho chemicko-fyzikální vlastnosti má vliv složení vstupního materiálu, technologie a doba kompostování (Hanc et al. 2014). Nežádoucí příměsi do kompostu jsou sklo, plasty, kov, stavební suť (ČSN 46 5735 2020).

Právě pro úspěšný rozvoj mikroorganismů musí být splněna řada podmínek. V kompostu jsou zastoupeny převážně heterotrofní mikroorganismy, které využívají pro život a vývoj zdroje uhlíku a kyslíku. Tyto mikroorganismy rozkládají organické látky a pomocí štěpení jejich vazeb získávají energii. Část těchto prvků oxiduje až na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Nejprve jsou biodegradací rozkládány sacharidy, bílkoviny a organické kyseliny, následně polysacharidy. Nakonec dojde k rozložení stabilních složek jako je lignin (Groda 1995). Na rozklad ligninu jsou vhodné houby, mají nižší požadavky na obsah dusíku a některé z nich jsou schopny ho zcela rozložit (Martinez et al. 2009).

Bakterie mají nejvýznamnější vliv na rozklad organické hmoty. Rozkládají lehce rozložitelné skupiny materiálu rychleji než jiné skupiny mikroorganismů. Některé bakterie jsou schopny zabudovávat atmosférický dusík (Hatayama et al. 2005; Pramanik et al. 2007).

Aktinomycety jsou skupina mikroorganismů, kterou lze díky vlastnostem zařadit mezi bakterie a houby, a to konkrétně jakým způsobem rozkládají organickou hmotu. Aktinomycety rozkládají komplexní organické molekuly, fenolické látky a steroidy (Ting et al. 2014).

Dle objemu a způsobu kompostování se proces rozčleňuje do tří základních skupin:

1. domácí kompostování,
2. komunitní kompostování,
3. průmyslové kompostování.

Domácí kompostování je ideální způsob nakládání s biologicky rozložitelnými odpady z domácnosti pocházejících například ze zahrady nebo kuchyně. K tomuto účelu lze využít před vyrobené kompostéry nebo je možné vyrobit si vlastní.

V případě komunitního kompostování jde převážně o úpravu biologicky rozložitelného odpadu z údržby obecní zeleně a zahrad občanů. Popřípadě na základě společné domluvy kompostují přímo občané určité oblasti. Například mohou kompostovat ve sdíleném vnitrobloku. Výsledný kompost se pak užívá na udržování zeleně v dané oblasti.

Průmyslové kompostárny zpracovávají velký objem biologicky rozložitelného materiálu a výsledný produkt je průmyslovým kompostem. Průmyslové kompostárny využívají různé technologie a kompost musí splňovat předepsané parametry zákonem a normou o kompostování.

### 3.3.1 Podmínky kompostování

Pro správné kompostování je nedílnou součástí dodržování ověřených postupů a parametrů, které se významně podílí na tvorbě kvalitního kompostu. To podléhá normě ČSN 46 5735 – Kompostování. Tato norma přesně udává požadavky na technologii, vliv na životní prostředí a výslednou kvalitu produktu. Norma se nevztahuje na domácí kompostování a vermikompostování. Při postupech kompostování stanovených normou je potřeba dodržet systém technologie, zajistit optimální podmínky, kontrolu procesu a kvalitu kompostu.

#### 3.3.1.1 Hodnota pH

Neutrální hodnota pH je pro většinu mikroorganismů nejpříznivější, ale v běžné praxi toho nelze úplně dosáhnout, a proto často pH kolísá. Podle normy o kompostování je, ale potřeba dosáhnout rozmezí 6 až 9.

Pokud je kompost zásaditý od hodnoty 8,5 výše přeměňují se dusíkaté látky na amoniak a z kompostu se ztrácí důležitá živina (Zemánek 2001).

#### 3.3.1.2 Materiálové zastoupení živin

Vhodný poměr počáteční směsi C:N 30 – 35:1, výsledný produkt pak má 15 – 20:1 C:N, v některých případech i méně. Tyto údaje se shodují s normou o kompostování ČSN 46 5735.

Organická hmota kromě uhlíku a dusíku obsahuje i další makroživiny jako fosfor, draslík, hořčík. Všechny tyto i další živiny jsou nezbytné pro správnou syntézu buněk.



Když nějaká z živin chybí nebo není přístupná pro mikroorganismy ovlivňuje to enzymatickou produkci mikroorganismů, pH a další faktory (Hejátková 2002).

Konkrétně fosfor a draslík jsou látky významné pro látkovou výměnu při rozmnožování buněk. Ostatní stopové prvky např. vápník, železo, bór či sodík jsou také důležité pro lepší asimilaci živin (Plíva 2006).

Při kompostování, oxidací organických látek dochází k uvolňování CO<sub>2</sub>. To má za následek snížení poměru C:N na požadovanou hodnotu. Nadměrné množství dusíku se uvolňuje ve formě amoniaku, který zapáchá. Jedná se o zápach, který kompostování běžně doprovází (Hejátková 2002).

### 3.3.1.3 Obsah kyslíku

Množství kyslíku v dutinách substrátu ovlivňuje struktura a pórovitost kompostovaného materiálu. V počátku je z těchto průduchů zaplněných vzduchem čerpán spotřebovávaný kyslík mikroorganismy. Je tedy nutné kompost překopávat pro dodání dalšího vzduchu. Rychlost spotřeby kyslíku je odrazem mikrobiální aktivity. Ideální zastoupení je od 15 do 20 % O<sub>2</sub> v kompostovaném tělese (Kalina 1999; Plíva 2006).

Je zřejmé, že vzduch vytváří aerobní podmínky, to, ale není jeho jediná funkce. Významně ovlivňuje snižování vlhkosti u kompostů bohatých na vodu a také reguluje teploty v procesu (Plíva 2006).

Kvalita provzdušnění působí na rychlost kompostování, ale i na kvalitu výsledné hmoty. Při vysoké míře kyslíku unikne velké množství tepla a tím se celý proces zpomalí.

### 3.3.1.4 Teplota a hygienizace

Dalším regulátorem aktivity mikroorganismů je teplota. Optimální teplotní rozmezí zakládky je 50 až 60 °C. Teplota ovlivňuje významně způsob kompostování. Při venkovním kompostování jsou v zakládce různé teploty, uvnitř hmoty a na okraji. Teplota se těžko reguluje a může docházet k rozdílným rychlostem rozkladu. Nízké teploty omezují až zastavují aktivitu mikroorganismů. Naopak vysoké mají na některé mikroorganismy účinek smrtící (Hejátková 2002).

Je důležité dosáhnout termofilní fáze pro hygienizaci kalu. Proces je založen na dostatečné vlhkosti 40 – 65 % a vhodných intervalech provzdušňování. V průběhu hygienizace musí být dodrženy teploty podle Tabulky 2 (ČSN 46 5735 2020).

Tabulka 2 - Teplotní režimy během kompostovacího procesu (ČSN 46 5735 2020)

| Pořadové číslo | Teplotní limit | Časový interval              |
|----------------|----------------|------------------------------|
| 1              | ≥ 70 °C        | souvisle po dobu min. 3 dny  |
| 2              | ≥ 65 °C        | souvisle po dobu min. 5 dní  |
| 3              | ≥ 60 °C        | souvisle po dobu min. 7 dní  |
| 4              | ≥ 55 °C        | souvisle po dobu min. 14 dní |

V případě zpracování čistírenských kalů nebo surovin, které mají charakter vedlejších produktů živočišného původu je potřeba provádět ověření účinnosti hygienizace v souladu

s právními předpisy a přílohou normy o kompostování. V ní je uvedeno, že ověření účinnosti hygienizace kompostovacího procesu se provádí na základě použité technologie buď metodou vnesených indikátorových mikroorganismů, nebo tam, kde nelze tuto metodu provést se bude postupovat podle metody vstup – výstup (ČSN 46 5735 2020).

Vnesený indikátorový organismus je *Salmonella senftenber* W 775 (H<sub>2</sub>S negativní). Kontejnery s inokulovanými organismy se vkládají do vstupů podle technologie kompostování. Je potřeba vzorky kompostu pro hodnocení odebírat pravidelně se stejným odstupem, a hlavně na konci procesu. Účinnost hygienizace se potvrdí v případě, že během kompostování dojde k redukci počtu sledovaných organismů o 5 řádů a zároveň je splněn požadavek na mikrobiální parametry v Tabulce 4 (ČSN 46 5735 2020).

Metoda vstup – výstup je založena na principu odběru 10 vzorků homogenizovaných surovin na vstupu a 10 vzorků kompostu na výstupu z té samé zakládky kompostu. V tomto případě se sledují *E. coli* a enterokoky. Pokud se jedná o kontinuální technologii vzorky jsou odebírány postupně při každém vstupu nové suroviny. Rozdíl na vstupu a výstupu mezi *E. coli* a enterokoky musí být alespoň o 5 řádů nižší a parametry pro výstup musí být v souladu s Tabulkou 4 (ČSN 46 5735 2020).

#### 3.3.1.5 Vlhkost

Vlhkost je důležitá pro osídlení, aktivitu a množení mikroorganismů, které provádí rozkladnou činnost. Nedostatečná vlhkost i nadměrná vlhkost se negativně projeví na pochodech mikroorganismů. Kompost je nutno pravidelně kontrolovat a v případě potřeby závlahu dodávat. Obsah vody by neměl klesnout pod 40 %. V raném stádiu kompostování je výhodnější vyšší vlhkost, v důsledku ztrát vody odpařením (Hejátková 2002).

Nadměrná vlhkost omezuje přístup vzduchu a vytváří anaerobní podmínky, při kterých je potlačena funkce termofilních mikroorganismů a proces kompostování může být nahrazen kvašením. Vedlejším účinkem kvašení je zápach v důsledku úniku amoniaku nebo methanu (Zemánek 2001).

Za optimální se považuje rozmezí 50 až 60 %. Vlhkost kompostu vychází ze zakládky a venkovních podmínek jako vítr a déšť, kterým je kompost vystaven (Plíva 2006).

### 3.3.2 Doba kompostování

Zralost kompostu neovlivňuje jenom délka procesu, ale také charakter kompostovaných surovin a vnější vlivy např. počasí. Důležitá je i využitá technologie. Za ideálních podmínek může být proces ukončen v 11 až 12 týdnu. Tato doba by měla být dostačující pro dosažení stabilního kompostu. Stabilitu kompostu lze také odhadnout podle teploty v tělese kompostu (viz Tabulka 3) (Plíva 2006).

Tabulka 3 - Určení stability kompostu pomocí teploty (Plíva 2006)

| Rozdíl teplot (°C) | Stupeň vyzrálosti         | Charakteristika |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| < 10               | velmi vyžralý             | stabilní        |
| 10 – 20            | průměrně vyžralý          | stabilní        |
| 20 – 30            | mírně v rozkladu          | aktivní         |
| 30 – 40            | čerstvý velmi aktivní     | aktivní         |
| > 40               | čerstvě smíchané suroviny | aktivní         |

### 3.3.3 Jakost kompostu

Před aplikací na zemědělskou půdu musí kompost splňovat mikrobiální hodnocení. Zda a v jaké míře obsahuje patogenní mikroorganismy, konkrétně enterokoky, *Escherichia coli* a *Salmonella*, která musí být ve výsledku negativní. Limitní hodnoty indikátorových mikroorganismů ve vlhkém kompostu vidíte v Tabulce 4.

Tabulka 4 - Limitní hodnoty indikátorových organismů ve vlhkém kompostu (ČSN 46 5735 2020)

| Indikátorový mikroorganismus            | Jednotky   | Nález     |                  |
|---|--|-----------|------------------|
| <i>Salmonella sp.</i>                   | nález v 50 g 5 zkoušených vzorků                   | negativní |                  |
| <i>Escherichia coli</i> nebo enterokoky | kolonie tvořící jednotku v 1 g 5 zkoušených vzorků | 1         | $< 5 \cdot 10^3$ |
|   |  | 4         | $< 10^3$         |

Dále musí kompost splňovat i limitní hodnoty rizikových prvků, které jsou předepsány vyhláškou o stanovení požadavků na hnojiva, ale i normou kompostování. V Tabulce 5 jsou vyjmenovány jednotlivé prvky a limitní hodnoty podle normy o kompostování.

Tabulka 5 - Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech nad 13 % sušiny v mg/kg sušiny (ČSN 46 5735 2020)

| Kadmium | Olovo | Rtut' | Arsen | Chrom | Měď' | Molybden | Nikl | Zinek |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|----------|------|-------|
| 2       | 100   | 1,0   | 30    | 100   | 150  | 20       | 50   | 600   |

Kromě výše zmíněných ukazatelů se podle normy ČSN 46 5735 Kompostování stanovuje vlhkost, spalitelné látky, celkový dusík, poměr C:N, pH, nerozložitelné příměsi a homogenita. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 6 (ČSN 46 5735 2020).

Tabulka 6 - Ukazatele jakosti kompostu (ČSN 46 5735 2020)

| Ukazatel   | Hodnota   |
|--|-----------|
| Poměr C:N  | max. 30   |
| Hodnota pH                                       | 6,0 – 9   |
| Vlhkost v % hm.                                  | 30 – 65   |
| Spalitelné látky v % hm. v sušině                | min. 20   |
| Celkový dusík v % hm. v sušině                   | min. 0,60 |
| Nerozložitelné příměsi > 20 mm v % hm. ve vzorku | < 3,0     |
| Nežádoucí příměsi > 5 mm v % hm. ve vzorku       | < 0,5     |
| Klíčivá semena v 1l kompostu v ks                | ≤ 3       |

### 3.3.4 Studie týkající se kompostování

Při kompostování kalu z ČOV je nutno přihlížet na vysoký obsah vody, malou pórovitost a vysokou viskozitu. Je dobré surovinu před kompostováním upravit, obvykle je možné naředit kal listy, pilinami, slámou nebo dřevem (Chen 2012). Příkladové studie a jejich souhrn v Tabulce 7.

Tabulka 7 - Výzkum kompostování kalů s přídatným materiálem

| Kompostovaný materiál          | Přídatný materiál                 | Zastoupení                           | Výzkum      | Autor                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------|
| Surový kal (S)                 | dřevní štěpka (D)                 | S:D<br>3:1<br>4:1<br>5:1             | venkovní    | (Zhao et al. 2015)      |
| Surový kal a odvodněný kal (O) | dřevní štěpka a piliny (P)        | S:O:D:P<br>7,4:1,0:1,4:2,3           | laboratorní | (Golbaz et al. 2021)    |
| Surový kal                     | biochar (B)<br>kukuřičný klas (K) | S:K:B<br>5:3:0<br>5:3:1<br>5 : 3 : 2 | laboratorní | (Liu et al. 2021)       |
| Surový kal                     | rostlinné zbytky (RZ) a půda (PŮ) | RZ:S:PŮ<br>2:1:1                     | laboratorní | (G. Guzman et al. 2020) |

Kvůli složitosti kompostování a ekonomickým nákladům je potřeba určit správné poměry kalu a ředícího materiálu pro neoptimalnější průběh. V článku Zhao et al. (2015)

použili při společném kompostování kalu a dřevní štěpky, která byla 2 až 3 cm dlouhá a 3 mm tlustá s poměry: varianta A – 3:1, varianta B - 4:1 a varianta C - 5:1 ve vlhké hmotnosti. Výsledek ukázal, že příměs dřevní štěpky měla hlavní vliv na acidifikaci a množství emisí amoniaku. Při nejmenším zastoupení štěpky bylo více amoniaku navázáno než uvolněno. Všechny ztráty N byly v důsledku uvolnění do ovzduší ve formách NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O nebo N<sub>2</sub>. Veškeré potenciály uvolněného CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> tak i NH<sub>3</sub> byly vypočteny na základě zůstatků C a N. Součet emisí NH<sub>3</sub> během procesu byl u varianty A 647 m<sup>3</sup>, u varianty B 393 m<sup>3</sup> a u varianty C 8 m<sup>3</sup>. U všech zkoumaných variant nebyla prokázána významná toxicita ohrožující lidské zdraví (Zhao et al. 2015).

Například studie o hodnocení společného kompostování čistírenských kalů, dřevní štěpky a pilin. Ve které byl při procesu kompostování smíchán kal s objemovými činidly a recyklovanými materiály. Na základě hodnocení jednotlivých variant se došlo k výsledku, že nejvhodnější byl hmotností poměr 7,4:1,0:1,4:2,3 následovně: surový kal, odvodněný kal, dřevěná štěpka a dřevěné piliny. Tento poměr byl vyhodnocen jako nejefektivnější z hlediska technické i ekonomické perspektivy. Směsi byly hodnoceny z hlediska fyzikálních, chemických a mikrobiálních vlastností. Zmíněný model měl optimální obsah vlhkosti (59,8 ± 0,5 %), organických látek (80,0 ± 2,6 %), sušiny (40,2 ± 0,6 %), poměru C:N (28,0 ± 1,6) a volného vzduchového prostoru (> 30 %) v kompostovací hromadě. Konečný produkt splňoval požadavky na obsah těžkých kovů a patogenů pro aplikaci na zemědělskou půdu podle Íránské legislativy. Vyvinutý model byl flexibilní a lze jej používat na různé typy kalů (Golbaz et al. 2021).

### 3.3.5 Výhody kompostu

Kompost nabízí mnoho výhod pro zemědělskou půdu. Zvyšuje retenční kapacitu, množství živin a sorpci živin v půdě, dále vylepšuje strukturu půdy a mikrobiální aktivitu (Ilie & Mihalache 2019). Po dodávce stabilního kompostu do půdy je minimalizováno narušení rovnováhy v půdě (Šarapatka & Urban 2006).

Kompostování je dobře zavedeno v průmyslovém měřítku pro zpracování biologicky rozložitelného odpadu i přes ztrátu dusíku volatilizací během termofilní fáze (Lazcano et al. 2008). Výhodou procesu je menší riziko poškození životního prostředí a produkce ekonomicky cenného kompostu. Dále je kompostování v souladu se strategií Evropské unie o snižování odpadu na skládkách (Hanc et al. 2014).

### 3.3.6 Nevýhody kompostu

Na základě charakteru vstupní biomasy určené ke kompostování je zde riziko zanesení nevhodné materiálu. Kompostovaná látka může obsahovat těžké kovy, které se při rozkladu organické hmoty často více koncentrují v důsledku mikrobiální degradace a ztráty uhlíku a vody v kompostu. Biologická dostupnost kovů se dá snížit délkou kompostování, během ní totiž dochází k procesům, které těžké kovy ovlivňují. Jedním z nich je humifikace organické hmoty. Ve studii Hanc et al. (2014) se výměnná část celkového obsahu prvků v konečném kompostu snížila v tomto pořadí Zn (17 %), Cd (11 %), Pb (4 %) a Cu (3 %) (Hanc et al. 2014; Farrell & Jones 2009).

### 3.4 Vermikompostování

Vermikompostování je biotechnologický proces přeměny organické hmoty na vermikompost při, kterém je žádoucí dosáhnout vysokého růstu a míry reprodukce žížal s cílem urychlit rozklad a stabilizaci biologicky rozložitelného materiálu (Aira et al. 2006). Dochází k biooxidaci a stabilizaci organické hmoty. Společně s půdními mikroorganismy mají rozhodující vliv na stabilizaci a degradaci právě žížaly (Hanc et al. 2020).

Kvalita potravy pro žížaly ovlivňuje velikost populace, jejich růst a rychlost reprodukce. Žížaly mohou ovlivňovat svůj vývoj a reprodukci na základě množství a přístupnosti živin. Reprodukci dokážou pozastavit ve prospěch vývoje a opačně (Domínguez et al. 2000).

Tato metoda je vnímána jako pokročilejší kompostování, díky nízkým nákladům na zpracování odpadů a přátelskost k životnímu prostředí. Počáteční výzkumy se datují od roku 1970 a pocházejí z USA a Německa (Edwards et al. 2011). V České republice se začala technologie využívat po roce 1985 (Kalina 1999). Zásadním rozdílem oproti klasickému kompostování je, že proces nezahrnuje termofilní fázi rozkladu.

Vermikompost neboli žížalí humus je výstupní surovina z procesu vermikompostování a vyznačuje se jako kompost, stabilní organickou hmotou. Je obzvláště účinné hnojivo a doplněk půdy ke zkvalitnění půdních mikroorganismů, zvýšení obsahu živin a má pozitivní vliv na zadržování vody (Sinha et al. 2010; Ilie & Mihalache 2019).

Toto hnojivo má vysoké procentuální zastoupení živin nezbytných pro rostliny. Na vermikompostování je potřeba používat vhodný druh žížaly, nejčastěji to je *Eisenia fetida* lidově kompostovací žížala. Tento druh žížaly zpracovává velké množství biologicky odbouratelného odpadu s vysokou produktivitou převodu na humus. (Ilie & Mihalache 2019) Kromě vermikompostu je produktem procesu i vodný výluh (Kalina 1999).

Nespornou výhodou vermikompostu je obsah živin. Kromě toho se žížalí humus prokazatelně podílí na zvýšené produkci a kvalitě na zemědělské půdě a pomáhá potlačit škodlivé houby. Žížaly produkují vitamíny, živiny, enzymy, aminokyseliny a minerální látky (Ilie & Mihalache 2019). Pomocí trávicího enzymu žížal fosfatázy, se přirozeně zvyšuje obsah dostupných forem fosforu. Díky těmto trávicím pochodům se přemění větší množství zpracované organické hmoty na lépe dostupné formy živin (Suthar 2010).

Vermikompost má pozitivní vliv nejenom na rostliny, ale i na kvalitu půdy. Zlepšuje její strukturu, zvyšuje provzdušnění a absorpci dusíku z atmosféry. Je vhodný ke zkvalitnění půd dlouhodobě zatížených chemickými látkami. K tomu závěru došel článek „Výroba vermikompostu a jeho význam pro půdu v zemědělské výrobě“, který hodnotí stávající zdroje literatury a sdružuje potvrzené informace z více zdrojů (Ilie & Mihalache 2019).

#### 3.4.1 Podmínky vermikompostování

Jako každý biochemický proces stabilizace organické hmoty má i vermikompostování optimální podmínky k rozkladu organické hmoty, růstu žížal a produkci kokonů.

#### 3.4.1.1 Hodnota pH

Žížaly kalifornské potřebují pH pohybují se v neutrální oblasti, ale zvládají výkyvy v rozmezí od 4,5 do 9, což se odvíjí od chemických vlastností vermikompostované hmoty (Edwards et al. 2011). Optimální a nestresující prostředí je pro žížaly v hodnotách 6,5 – 8,5 (Zajonc 1992).

Právě charakter odpadu závažně ovlivňuje hodnotu pH. Postupným rozkladem organické hmoty vznikají meziprodukty jako huminové kyseliny nebo amoniak. Částice těchto látek mohou pozměňovat výslednou hodnotu pH na celé škále od kyselé po zásadité.

#### 3.4.1.2 Obsah kyslíku

Dostatek kyslíku je závislý v základce podle druhu vermikompostovaných surovin. Optimálně je potřeba alespoň 15 % kyslíku uvnitř základky, toho lze sáhnout nejenom dostatečně porézním materiálem, ale také vrstvením základky. Dostatek vzduchu podporují žížaly vytvářením tunýlků a zavrtáváním (Zajonc 1992).

#### 3.4.1.3 Teplota

Bylo uvedeno v předchozích kapitolách při vermikompostování neprobíhá termofilní fáze. Teplota je další podstatným faktorem ovlivňujícím aktivitu, růst a reprodukci žížal. Příhodné teplotní podmínky pro život jsou v rozhraní od 15 do 25 °C. Tolerance teploty pro žížaly se pohybuje mezi 9 až 35 °C, při dosažení minima i maxima se jejich funkce značně zpomaluje, může také dojít k úhynu (Borah et al. 2007).

Teploty převyšující 30 °C vedou ke zvýšené aktivitě žížal i mikroorganismů, což zapříčiní rychlou spotřebu kyslíku a negativní dopad na žížaly (Sinha et al. 2002).

#### 3.4.1.4 Vlhkost

Žížaly obsahují zhruba 70 až 90 % vody. Z toho vyplývá, že ke svému životu potřebují dostatečnou vlhkost v substrátu. Jsou to vlhkomilní živočichové. Optimálně 55 – 80 %, přičemž vlhkost by neměla překročit 90 %. Vlhkost nad optimální hodnotu omezuje obsah kyslíku a zapříčiní nástup anaerobních biochemických procesů. Konkrétně pro druh *Eisenia fetida* je optimální vlhkost 70 %. (Zajonc 1992).

#### 3.4.1.5 Rizikové faktory

Žížaly jsou živočichové citliví na změny v podmínkách prostředí, zcela smrtelný pro ně může být amoniak NH<sub>3</sub> v koncentraci nad 0,1 %. Vysoký podíl dusíku v základce urychluje rozklad a vznik toxického amoniaku. Další nebezpečnou látkou jsou nerozpuštěné soli, žížaly umírají už při překročení koncentrace 0,5 % (Zajonc 1992).

Dalším potenciálním nebezpečím jsou proteiny (bílkoviny), koncentrace nad 45 % je pro kroužkovce smrtelná. Bílkoviny podporují rozvoj patogenních mikroorganismů jako *Salmonella*, která díky bílkovinám, může ve vermikompostu dlouho přežít. Kromě toho jsou žížaly náchylné na pesticidy, těžké kovy a organické polutanty (Tesařová 2010).

Při vermikompostování nelze opomenout působení vnějšího okolí, nejenom počasí. Svou roli hrají dravci, kteří mají za přirozené žížaly konzumovat. Konkrétně ptáci, jako drozdi, havrani i další. Ze savců krtek, občas i ježek, jezevec a liška (Zajonc 1992).

### 3.4.2 Hygienizace vermikompostu

Jak už jsme si řekli, tak i podle normy Kompostování je potřeba aby kompost prošel termofilní fází, která zpomaluje a usmrcuje patogenní organismy. Tato fáze, ale při vermikompostování neprobíhá, jelikož teplota nad 35 °C je pro žížaly smrtelná. Problém patogenních mikroorganismů se dá například řešit předkompostováním materiálu, ale podle studie Edwardse et al. (2011) došlo k příznivým změnám v obsahu *E. coli* a *Salmonelly* v čistírenských kalech během laboratorního pokusu i bez předkompostování. V závěru zkoumání počet patogenních mikroorganismů splňoval požadované limity pro jejich výskyt (Edwards et al. 2011).

Na bližší hodnoty se můžeme podívat ve studii Eastman et al. (2001). Došlo k experimentálnímu testování vermikompostování substrátu z domácích zbytků odpadních vod konkrétně zbylé pevné látky. Zkušební i kontrolní řady byly silně naočkovány čtyřmi indikátory lidských patogenů, koliformními bakteriemi, *Salmonellou spp.*, enterokoky a vajíčky geohelminů (Eastman et al. 2001).

Test ukázal, že snížení patogenů bylo větší ve vermikompostu než v kontrolní řadě bez žížal v průběhu 144 hodin. Vzorky testovacích řad ukázaly snížení fekálních koliformních bakterií o 6,4log ve srovnání s kontrolou, kde došlo ke snížení pouze o 1,6log. U *Salmonelly spp.* došlo ke snížení v testovací variantě o 8,6log a v kontrolní řadě byla redukce 4,9log. Další vzorky z testovací řady pro enterokoky měly snížení o 4,8log a kontrolní vzorek zaznamenal redukci o 1,8log. V neposední řadě úbytek vajíček geohelminů byl ve vermikompostu o 1,9log a v kontrole pouze o 0,6log. Tyto výsledky společně s dalšími studiemi ukazují, že vermikompostování může být vhodnou alternativou pro biologickou stabilizaci biologicky rozložitelného odpadu obsahující patogenní mikroorganismy (Eastman et al. 2001).

Další pokus od Suthar (2010) prokázal vliv žížalích výměšků na hygienizaci. Redukci podporují trávicí enzymy, sekrece tekutin a jejich antibakteriální vlastnosti. Žížaly ovlivňují mikrobiální podmínky průchodem zpracovávané biomasy trávicím traktem. Výměšky obohacují vermikompost o dusík, ten podporuje rozvoj mikroorganismů, které dusík fixují, a tak dochází k přirozené kompetici mezi vhodnými a patogenními bakteriemi (Suthar 2010).

### 3.4.3 Složení vermikompostu

Každý živočich včetně žížaly potřebuje k životu plnohodnotnou stravu. Skladbu živých surovin je nutno dobře naplánovat pro zefektivnění provozu. Žížaly potřebují bílkoviny, tuky, vitamíny, cukry a minerály. Všechny tyto látky čerpají z vermikompostovaného materiálu. Nedokážou zpracovávat bílkoviny jednoduchého charakteru jako vaječný bílek nebo maso. Proto jsou zbytky vařeného, syrového masa a vajec nevhodné pro vermikompostování a z mnoha důvodů i pro kompostování. Žížalám jako zdroj bílkovin bohatě stačí konzumace bakterií a prvků. Důležitá živina a zdroj energie je pro ně celulóza. Každý organický materiál založený na celulóze je vhodným zdrojem živin. Zahradní



odpad, tráva, zbytky zeleniny a ovoce či čaj a kávová sedlina jsou příhodné látky plné důležitých živin (Zajonc 1992).

### 3.5 Porovnání systémů kompostování a vermikompostovní

Porovnání obou typů procesů je shrnuto v Tabulce 8. Zde jsou popsány zásadní rozdíly mezi těmi technologiemi. Například můžeme vidět, že při vermikompostování neprobíhá termofilná fáze a proces je mnohem delší než klasické kompostování. Při kompostování na rozklad působí hlavně vysoká teplota.

Tabulka 8 - Porovnání procesů – souhrn z vypracovaného přehledu literatury (Zajonc 1992; Kalina 1999; Kalina 2004)

| Parametr           | Klasické kompostování                             | Vermikompostování                          |
|--------------------|---|--|
| Termofilní fáze    | ano   | ne   |
| Přístup vzduchu    | promícháváním, překopávky                         | činností žížal                             |
| Potlačení patogenů | vysoké teploty, dodáváním antimikrobiálních látek | enzymatické látky, výměšky a trávení žížal |
| Běžná délka cyklu  | 90 dní  | 300 dní                                    |
| Kvalita kompostu   | nižší   | vyšší                                      |

Porovnání látkového složení kompostu a vermikompostu podle dalšího autora Kalina (2004) dle Tabulky 9 Tabulka 9. Která nám ukazuje optimální hodnoty jednotlivých živin, mezi kterými by se měly pohybovat reálné hodnoty na konci procesů. Je důležitá přítomnost P, K i dalších makroživin pro zachování kvality kompostu a vermikompostu.

Tabulka 9 - Obsah živin v % sušiny (Kalina 2004)

| Parametr                                   | Kompost     | Vermikompost |
|--|-------------|--------------|
| Celkový N                                  | 0,5 – 1,5   | 1,0 – 3,0    |
| Celkový P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 0,1 – 0,8   | 0,2 – 3,0    |
| Celkový K (K <sub>2</sub> O)               | 0,3 – 0,8   | 0,2 – 3,0    |
| CaO  | 1,0 – 12,0  | 1,0 – 12,0   |
| MgO  | 0,2 – 3,3   | 0,3 – 3,3    |
| Organická hmota                            | 20 – 40     | 30 – 55      |
| Poměr C:N                                  | 12 – 30 : 1 | 8 – 15:1     |
| pH   | 6,5 – 8     | 6,5 – 8      |

Výzkum srovnání chemických a mikrobiálních změn během aerobního kompostování a vermikompostování zeleného odpadu ukázal, že během roku došlo ke snížení obsahu ligninu, celulózy, poměru C:N a zvýšení elektrické vodivosti (EC), a přístupného fosforu. Důležité parametry v Tabulce 10. Zelený odpad se skládal převážně z odřezků rostlin z botanické zahrady z Pekingu. Kvalita konečného produktu na konci pokusu byla vyšší u vermikompostovaného materiálu než u kompostovaného, to mohlo být způsobeno aktivitou žížal, které zrychlují mineralizaci organické hmoty. Větší množství dostupného

fosforu je ve vermikompostu také pravděpodobně zapříčiněno zrychlenou degradací způsobenou žížalami (Cai et al. 2018).

Tabulka 10 - Přehled parametrů při zpracování zeleného odpadu (Cai et al. 2018)

| Varianta          | pH  | EC (dS/m) | TOC(g/kg) | Přístupný P (g/kg) | C:N  |
|-------------------|-----|-----------|-----------|--------------------|------|
| Vstupní hodnoty   | 6,5 | 0,5       | 432,3     | 0,5                | 34,5 |
| Kompostování      | 8,2 | 1,6       | 325,9     | 0,8                | 14,2 |
| Vermikompostování | 7,7 | 1,9       | 295,1     | 1,1                | 11,5 |

U další studie zaměřené na srovnání účinnosti kompostování a vermikompostování pro biologickou stabilizaci hnoje skotu bylo prokázáno, že využití technologie nesnížily množství obsahu rozpuštěného organického uhlíku a dusíku ve srovnání s kontrolou, ale je nutné podotknout, že ke stabilizaci by mohl být vyžadován delší časový horizont (viz Tabulka 11). Kompostování probíhalo 15 dní, vermikompostování 40 dní, kombinovaný proces 55 dní. Hnůj byl kombinací výkalů, moči a slámy ze zemědělského komplexu ve Španělsku. Kombinovaná technologie kompostování a vermikompostování byla z hlediska stabilizace hnoje nejúčinnější. Žížaly podpořily retenci dusíku a postupné uvolňování fosforu. Poměr C:N se při kompostování zvýšil jelikož došlo k degradaci pevného polymerního materiálu po termofilní fázi a mohlo tak dojít k tvorbě rozpustné organické hmoty která koncentraci zvýšila (Lazcano et al. 2008).

Tabulka 11 - Přehled parametrů při zpracování hnoje skotu (Lazcano et al. 2008)

| Varianta         | pH        | EC (dS/m) | TOC (g/kg) | Přístupný P (mg/kg) | C:N  | DOC (mg/kg) |
|------------------|-----------|-----------|------------|---------------------|------|-------------|
| Vstupní hodnoty  | 7,70-8,94 | 1,25      | 399,2      | 211                 | 17,0 | 4406        |
| Kompostovní      | 8,07-8,86 | 2.13      | 384,9      | 342                 | 17,5 | 9338        |
| Vermikompostovní | 7,51-7,73 | 0.78      | 314,0      | 111                 | 11,1 | 5249        |
| Kombinace        | 7,14-7,85 | 0.72      | 309,0      | 109                 | 11,3 | 4825        |

Studie od Yilmaz Cincin a Agdag (2019) se zaměřuje na porovnání technologie vermikompostování pro stabilizaci kalu z ČOV smíchaného se zeleným odpadem, vstupní parametry jsou uvedeny v Tabulce 12. Kromě základní kontrolní varianty kompostování a vermikompostování byla varianta s přidávkou mikrobiálního hnojiva Bio-One™, čerstvého vermikompostu buď z kalu nebo z kravského hnoje, se 100% recirkulací vodného výluhu, s 50% recirkulací vodného výluhu a v poslední řadě byly varianty s vysokou podporou provzdušnění a s nízkým intervalem provzdušňování. Pokus byl prováděn po dobu 60 dnů. Bylo sledováno pH, elektrická vodivost, C:N a celkový uhlík (TOC) (viz Tabulka 13).

Ze závěru vyplývá, že vermikompostování je rychlejší proces než kompostování z hlediska rozkladu organické hmoty. Také se ukázalo že mikrobiální hnojivo Bio-One™ má podíl na zrychlení rozkladu. Částečná recirkulace výluhu byla klasifikována jako vhodná metoda pro podporu vermikompostování. Jako příhodnější se ukázal přídavek zralého vermikompostu z kravského hnoje oproti vermikompostu z kalu. Na závěr se hodnotilo provzdušňování, kde obě varianty intenzivní i slabé provzdušňování mělo kladný vliv na rychlost rozkladu a finální hodnoty sledovaných parametrů (Yilmaz Cincin & Agdag 2019).

Tabulka 12 -Přehled parametrů vstupních materiálů při zpracování kalu z ČOV se zeleným odpadem (Yilmaz Cincin & Agdag 2019)

| Varianta                        | pH   | EC (µs/cm) | TOC (%) | C:N   |
|---------------------------------|------|------------|---------|-------|
| Vstupní hodnoty kalu            | 7,60 | 1601       | 24,13   | 10,40 |
| Vstupní hodnoty zeleného odpadu | 6,60 | 1543       | 34,52   | 31,38 |

Tabulka 13 – Přehled parametrů po 60 dnech kompostování případně vermikompostování (Yilmaz Cincin & Agdag 2019)

| Varianta  | pH   | EC (µs/cm) | TOC (%) | C:N   |
|---|------|------------|---------|-------|
| Kompostování  | 9,09 | 2270       | 23,77   | 20,14 |
| Vermikompostování   | 9,14 | 1910       | 20,32   | 16,39 |
| Vermikompostování s přídavkem Bio-One™                        | 9,04 | 2870       | 21,12   | 14,17 |
| 100 % recirkulace vodného výluhu při vermikompostování        | 9,38 | 2140       | 19,80   | 12,92 |
| 50 % recirkulace vodného výluhu při vermikompostování         | 9,11 | 2560       | 17,39   | 11,42 |
| Vermikompostování s přídavkem vermikompostu z kalu            | 8,87 | 1680       | 15,85   | 9,61  |
| Vermikompostování s přídavkem vermikompostu z kravského hnoje | 8,85 | 2460       | 16,52   | 14,03 |
| Vermikompostování s intenzivním provzdušňováním               | 9,04 | 3550       | 20,30   | 15,40 |
| Vermikompostování s nízkým intervalem provzdušňování          | 9,10 | 2890       | 19,96   | 14,23 |

Výzkum Guzman (2020) hodnotil různé techniky předúpravy kalu z ČOV pomocí kompostování, vermikompostování i společného kompostování a vermikompostování, na vliv a odstranění těžkých kovů a koliformních bakterií. Výsledky ukázaly, že u surového kalu bez úpravy pro rtuť a kadmium výsledky převýšily povolené limity ve filipínské národní normě. Vzorky byly následně podrobeny kompostování, vermikompostování a společnému zpracování při kterém došlo ke snížení množství rtuti a kadmia. Všechny vzorky před i po úpravě měly nízký obsah živin (viz Tabulka 14) (G. Guzman et al. 2020).

Vzorky kalu použité ve výše uvedené studii pocházely z ČOV na ostrově Luzon na Filipínách. Kombinovaná úprava kalu probíhala nejprve předkompostováním se zbytky zeleniny a půdy v poměru 1:2:1 po dobu 28 dní. Předkompostovaný materiál byl vermikompostován pomocí *Eudrilus eugeniae* 30 dní. Mimo to bylo zkoušeno samostatné kompostování ve stejném materiálovém poměru po dobu 30 dní a také samostatné vermikompostování se stejným zastoupením kalu, odpadu ze zeleniny a půdy během 30 dní (G. Guzman et al. 2020).

Tabulka 14 – Přehled parametrů při zpracování kalu a odpadu ze zeleniny (G. Guzman et al. 2020)

| Varianta                      | pH   | TOC (%) | Celkový P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | Celkový K <sub>2</sub> O (%) |
|-------------------------------|------|---------|---|------------------------------|
| Vstupní hodnoty surového kalu | 6,84 | 1,28    | 0,040                                     | 0,35                         |
| Kompostování                  | 6,8  | 1,12    | 0,086                                     | 0,36                         |
| Vermikompostovní              | 7,11 | 0,51    | 0,006                                     | 0,37                         |
| Kombinace                     | 7,02 | 0,49    | 0,017                                     | 0,36                         |

Soobhany et al. (2015) posuzoval a porovnával redistribuci obsahu živin N, P, K, Ca, Mg a Na během procesu kompostování a vermikompostování organických složek komunálního tuhého odpadu po dobu 10 týdnů. Při vermikompostování byla použita žížala *Eudrilus eugeniae*. V organické části substrátu byly stanoveny počáteční obsahy živin. Na základě analýz bylo prokázáno, že obsahy narostly jak během kompostování, tak i vermikompostování. Vermikompostovací proces zapříčinil nárůst P (67,2 – 87,5 %), K (24,9 – 45,8 %), Mg (12,2 – 63,8 %) a Na (30,2 – 40,5 %) proti kompostování. Tento výsledek je způsoben bakteriální a fekální aktivitou enzymů ze střev žížal vedoucí k mobilizaci a mineralizaci živin (Soobhany et al. 2015).

Studie zaměřená na rozklad kokosové dřevě ze slupky kokosu, zeleného odpadu nebo příměsí hnoje s využitím předkompostování a vermikompostování pracovala s různým mísením poměru vzorků (viz Tabulka 15) a zaočkováním houbou hlívy ústříčné. Materiály byly předkompostovány 28 dní s případkem houby a následně vermikompostovány s *Eisenia fetida* a *Eudrilus eugeniae*. Výsledky ukázaly významné snížení celulózy, na kterou je bohatý odpad z kokosu, ligninu, organického uhlíku, poměru C:N, poměru C:P a zvýšení živin dostupných pro rostliny. Index účinnosti obnovy živin byl vyšší u varianty druhé, která měla poměr (4:3:3 – kokos, zelený odpad, kravský hnůj) a u varianty 3 (5:3:2). Další

zkoumání potvrdilo stabilitu těchto variant (viz Tabulka 16). Studie potvrzuje, že tyto dvě varianty jsou vhodné jako obohacený vermikompost (Karmegam et al. 2021).

Tabulka 15 - Poměry namíchaných surovin v % (Karmegam et al. 2021)

| Varianta | Kokosový odpad | Zelený odpad | Kravský hnůj |
|----------|----------------|--------------|--------------|
| 1        | 50             | 0            | 50           |
| 2        | 40             | 30           | 30           |
| 3        | 50             | 30           | 20           |
| 4        | 50             | 40           | 10           |
| 5        | 50             | 50           | 0            |

Tabulka 16 – Přehled parametrů u předkompostování a vermikompostování kokosového odpadu (Karmegam et al. 2021)

| Parametr   | Varianta      |               |               |               |               |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|            | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             |
| pH         | 6,84 ± 0,08   | 7,07 ± 0,15   | 6,93 ± 0,12   | 6,99 ± 0,20   | 7,06 ± 0,18   |
| EC (dS/m)  | 1,15 ± 0,01   | 1,06 ± 0,02   | 0,98 ± 0,02   | 0,92 ± 0,03   | 0,87 ± 0,02   |
| TOC (g/kg) | 306,88 ± 3,59 | 351,29 ± 4,11 | 337,23 ± 8,54 | 348,99 ± 8,49 | 361,21 ± 8,43 |
| C:N        | 40,77 ± 0,58  | 24,97 ± 0,36  | 26,12 ± 0,64  | 23,62 ± 0,91  | 21,66 ± 0,42  |

Cílem porovnání agrochemických vlastností kompostu a vermikompostu z kalu z čistíren odpadních vod od Rékási et al. (2019) bylo zjistit, zda agrochemické vlastnosti vermikompostu připraveného z předkompostovaného materiálu budou mít lepší vlastnosti než klasický kompost. Kal byl mísen s různými přísadami jako zeleným odpadem, pšeničnou slámou s přidávkou kravského hnoje a biouhlem. Předkompostování probíhalo 1,5 měsíce, po kterém následovaly 3 měsíce vermikompostování s *Eisenia fetida* nebo pokračování v kompostování.

Výsledkem bylo, že vermikompostování nevedlo k významnější mineralizaci než kompostování. Průměrný obsah organického uhlíku byl ve vermikompostu 21,2 % a v kompostu 22,2 %. Proto jsou si velice podobné i průměrné přístupné hodnoty dusíku, fosforu a draslíku. Vermikompost se projevil příznivěji z hlediska koncentrace kinetinu ten byl 2x vyšší. Kinetin a auxin jsou rostlinné růstové hormony, které se běžně vyskytují ve vermikompostech. Ve studii se uvádí, že je potřeba dalších testů a analýz pro monitorování růstu rostlin a vyhodnocení dalších výsledků (Rékási et al. 2019).

Další studie uvádí, že vermikompost má větší kvalitu než klasický kompost také v důsledku průchodu trávicím traktem žížaly. Při trávení žížaly dochází i k hygienizaci (Aira et al. 2006).

## 4 Materiál a metody

Pokus probíhal na Výzkumné stanici České zemědělské univerzity v Červeném Újezdu a následná analýza vzorků v laboratořích ČZU v Praze.

### 4.1 Přípravné práce

V první fázi pokusu byly připraveny laboratorní prostory v Červeném Újezdu a testovací nádoby. Konkrétně aerobní fermentory (viz Obrázek 1) a vermikompostovací misky. Dále byly shromážděny pomůcky na míchání substrátu, analytické a laboratorní váhy.

Pro předkompostování materiálu bylo nutné vyčistit aerobní fermentory od předchozích pokusů. Součástí dna aerobního fermentoru byla plastová podložka, na kterou byla umístěna prodyšná pórovitá látka, aby se omezil pohyb částic v aerobním fermentoru, směrem k provzdušňovací technice.



Obrázek 1 - Aerobní fermentor

Následovalo vyčištění vermikompostovacích nádob, ukázka na Obrázku 2 a odkapávacích misek. Podle velikosti bedýnek byla nastříhána jemná propustná látka, stejná jako u aerobních fermentorů, síťka z plastu a geotextílie.



Obrázek 2 - Vermikompostovací boxy

## 4.2 Suroviny

Při zkoumání byl použit nestabilizovaný kal z ČOV a slaměné pelety s vodou. Jednalo se o kal z čištění městských odpadních vod. V Tabulce 17 jsou znázorněny poměry jednotlivých surovin. Suché slaměné pelety byly míchány s horkou vodou v poměru 4 litry vody na 1 kg slaměných pelet. Vlhké pelety byly po promíchání přidány ke kalu. Pro dosažení kvalitního promíchání, nebyly suroviny míchány vždy v plné dávce, ale v menších. Ty se promíchaly, spojily dohromady a znovu promíchaly. Takto připravený materiál byl dávkován do aerobních fermentorů na předkompostování.

Tabulka 17 - Poměr namíchaných vlhkých surovin použitých pro aerobní fermentory

| Aerobní fermentor | Kal (%) | Kal (kg) | Vlhké pelety (%) | Vlhké pelety (kg) |
|-------------------|---------|----------|------------------|-------------------|
| 1                 | 100     | 45       | 0                | 0                 |
| 2                 | 75      | 33,75    | 25               | 11,25             |
| 3                 | 50      | 22,5     | 50               | 22,5              |
| 4                 | 25      | 11,25    | 75               | 33,75             |
| 5                 | 0       | 0        | 100              | 45                |
| 7                 | 100     | 45       | 0                | 0                 |
| 8                 | 75      | 33,75    | 25               | 11,25             |
| 9                 | 50      | 22,5     | 50               | 22,5              |
| 10                | 25      | 11,25    | 75               | 33,75             |
| 11                | 0       | 0        | 100              | 45                |

### 4.3 Předkompostování

Dne 5. března 2020 proběhlo mísení materiálů podle Kapitoly 4.2. Suroviny z jednotlivých variant byly plněny do aerobních fermentorů. Každá varianta měla dvě opakování. Aerobní fermentace probíhala 14 dní, během toho byla sledována teplota v intervalu jedné hodiny. Fermentory byly provzdušňovány rychlostí 4 litry vzduchu za minutu po dobu 5 minut za každou uplynulou půl hodinu.

### 4.4 Vermikompostování

Dne 18. března 2020 proběhlo ukončení aerobní fermentace a přechod na vermikompostování pomocí žížal *Eisenia andrei*. K tomu byly využity předkompostované suroviny. Materiál z každého opakování byl vyjmut, promísen i společně s vodným výluhem a z výsledného základu se plnily vermikompostovací misky. Před naplněním byla na dno každé vermikompostovací misky umístěna síťka, aby nedocházelo k odplavování částic surovin do záchytné misky skrz otvory ve dně. Vermikompostovací nádoby se plnily ve třech opakováních podle Tabulky 18, do dvou třetin objemu nádoby ukázka na Obrázku 3. Do zbylé třetiny byl nasypán substrát o objemu 3 litry, který obsahoval žížaly. Předkompostované suroviny a žížalí substrát byly odděleny plastovou modrou sítkou zhruba s centimetr velkými oky pro snadné přesouvání žížal ze substrátu do vermikompostované suroviny a zpět. Na takto připravenou vermikompostovací misku byla umístěna geotextilie.

Tabulka 18 - Způsob plnění vermikompostovacích misek podle variant a substrátu

| Aerobní fermentor | Varianta | Kal (%) | Kal (kg) | Vlhké pelety (%) | Vlhké pelety (kg) | Žížalí substrát (l) | Měření teploty |
|-------------------|----------|---------|----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------|
| 1 + 7             | 8A       | 100     | 9        | 0                | 0                 | 3                   | Ne             |
| 1 + 7             | 8B       | 100     | 9        | 0                | 0                 | 3                   | Ano            |
| 1 + 7             | 8C       | 100     | 9        | 0                | 0                 | 3                   | Ne             |
| 2 + 8             | 9A       | 75      | 6,75     | 25               | 2,25              | 3                   | Ne             |
| 2 + 8             | 9B       | 75      | 6,75     | 25               | 2,25              | 3                   | Ano            |
| 2 + 8             | 9C       | 75      | 6,75     | 25               | 2,25              | 3                   | Ne             |
| 3 + 9             | 10A      | 50      | 4,5      | 50               | 4,5               | 3                   | Ne             |
| 3 + 9             | 10B      | 50      | 4,5      | 50               | 4,5               | 3                   | Ano            |
| 3 + 9             | 10C      | 50      | 4,5      | 50               | 4,5               | 3                   | Ne             |
| 4 + 10            | 11A      | 25      | 2,25     | 75               | 6,75              | 3                   | Ne             |
| 4 + 10            | 11B      | 25      | 2,25     | 75               | 6,75              | 3                   | Ano            |
| 4 + 10            | 11C      | 25      | 2,25     | 75               | 6,75              | 3                   | Ne             |
| 5 + 11            | 12A      | 0       | 0        | 100              | 9                 | 3                   | Ne             |
| 5 + 11            | 12B      | 0       | 0        | 100              | 9                 | 3                   | Ano            |
| 5 + 11            | 12C      | 0       | 0        | 100              | 9                 | 3                   | Ne             |





Obrázek 3 - Plnění vermikompostovací misky, na obrázku nahoře vermikompostovaná surovina a dole žížalí substrát

Bedýnky byly vyskládány do stojanu ve speciální místnosti s regulovanou teplotu a vlhkostí. Stabilní teplota byla udržována na 23 °C. Vermikompostování probíhalo po dobu 4 měsíců. Průběžně byla prováděna kontrola vlhkosti a docházelo k ovlhčování vodou v případě potřeby. Dále byl proteklý materiál ze záchytné misky vrácen zpět do vermikompostovací misky.

## 4.5 Odběr a úprava vzorků

### 4.5.1 Předkompostování odběr vzorků

#### 4.5.1.1 Odběr 5.3.2020 – začátek předkompostování

- 3 x 200 g z každého druhu směsi materiálu určeného pro předkompostování, jmenovitě aerobní fermentory vždy dohromady (1 + 7); (2 + 8); (3 + 9); (4 + 10) a (5 + 11) určeno k sušení
- 3 x 150 g viz stejný postup jako u předchozího odběru uskladnění v mrazáku
- 3 x 30 g viz stejný postup jako u předchozího odběru uskladnění v lednici

#### 4.5.1.2 Odběr 18.3.2020 – ukončení předkompostování

- 3 x 200 g promíchané předkompostované směsi materiálu z aerobních fermentorů vždy dohromady (1 + 7); (2 + 8); (3 + 9); (4 + 10) a (5 + 11) určeno k sušení

- 3 x 150 g viz stejný postup jako u předchozího odběru uskladnění v mrazáku
- 3 x 30 g viz stejný postup jako u předchozího odběru uskladnění v lednici

Pro lepší představu je zde Tabulka 19, kde jsou uvedeny jednotlivé odběry z promíchané směsi svou aerobních fermentorů.

Tabulka 19 - Odběr vzorků materiálu z procesu předkompostování

| Aerobní fermentor | Odběr vzorku                    |                                 |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                   | 5.3.2020                        | 18.3.2020                       |
| 1 + 7             | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g |
| 2 + 8             | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g |
| 3 + 9             | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g |
| 4 + 10            | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g |
| 5 + 11            | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g | 3 x 200 g, 3 x 150 g a 3 x 30 g |

#### 4.5.2 Vermikompostování odběr vzorků

##### 4.5.2.1 Odběr vzorku 18.3.2020 – začátek vermikompostování

Odebrané vzorky z ukončeného předkompostování odpovídají zároveň i vstupním vzorkům pro začátek vermikompostování. Bylo uvedeno v Kapitole 4.4, vermikompostovací misky byly plněny směsí předkompostovaného materiálu vždy z odpovídajícího aerobního fermentoru viz Tabulka 18. To znamená, že vzorky odebrané přímo z kompostérů odpovídají i směsi umístěné do vermikompostovacích misek.

##### 4.5.2.2 Odběr duben, květen, červen – průběh vermikompostování

Z každé vermikompostovací nádoby bylo v průběhu dubna, května a června odebráno jedenkrát 500 g vermikompostu určeného k oddělení žížal od vermikompostu a navážení vzorku vermikompostovaného materiálu neobsahujícího žížaly. Ze zmíněných 500 gramů byly tedy vybrány žížaly, které byly následně zváženy a zamrazeny. Bližší popis postupu oddělování žížal v Kapitole 4.5.2.4

Z vermikompostu, ze kterého byly vytřízeny žížaly. To je tedy 500 gramů vermikompostu bez žížal se následně odebralo:

- 1 x 200 g vermikompostu z každé varianty na sušení
- 1 x 150 g vermikompostu z každé varianty do mrazáku
- 1 x 30 g vermikompostu z každé varianty do lednice

#### 4.5.2.3 Odběr červenec 17.3.2020 – ukončení vermikompostování

Pro ukončení pokusu se postupovalo stejně jako při odběrech v dubnu, květnu a červnu. Popsaným způsobem byl odebrán vermikompost z něj se vytrídily žížaly a z vermikompostu bez žížal odebraly vzorky určené k sušení, do mrazáku a do lednici.

Navíc se tento postup aplikoval i na substrát, který se společně s upravovaným materiálem nacházel ve vermikompostovací misce.

Ze substrátu bylo odebráno 500 g a z něj byly vyjmuty ručním počítáním žížaly. 500 g substrátu mínus odebraná hmotnost žížal bylo potom určeno k navážení vzorků do sušárny, do lednice a do mrazáku.

#### 4.5.2.4 Oddělování žížal

Ruční promíchávání vermikompostu, by před odběrem žížal mohlo zapříčít jejich usmrcení a umělé snižování populace. Jednalo by se také o intenzivní zásah do prostředí, které si žížaly během měsíce od posledního odběru vybudovaly.

Tak, jak bylo řečeno v předchozích odstavcích kapitoly odběr a úprava vzorků. Kromě sběru předkompostované a vermikompostované hmoty a žížalího substrátu se odebíraly vzorky žížalí biomasy.

Jednalo se o počet žížal, které dorostly alespoň délky 3 cm. Tyto žížaly byly ručně odděleny z 500 g vermikompostu popřípadě na konci pokusu i ze substrátu.

Odběr vermikompostu byl proveden v místech označených na Obrázku 4 a také na Obrázku 5, jak odběr probíhal v praxi.



Obrázek 4 - Odběrová místa na 500 g vermikompostované hmoty



Obrázek 5 - Odběr vermikompostu v praxi

Pro vyjmutí žížal z vermikompostu se používaly pinzety. Kromě počtu žížal se také počítal počet kokonů. Kokony se samostatně nesbíraly, ponechávaly se ve vermikompostu. Probírání jednoho vzorku trvalo mezi 15 až 30 minutami podle charakteru materiálu. Žížaly z každé varianty byly umyty (viz Obrázek 6) a po očištění vloženy do pytlíku a zamrazeny.



Obrázek 6 - Umyté žížaly v kalíšku

### 4.5.3 Sušení vzorků

Vzorky vermikompostu určené k sušení byly naváženy do hliníkových misek a vloženy do sušárny po dobu jednoho měsíce při teplotě 30 °C (viz Obrázek 7). Čerstvé i usušené vzorky byly skladovány v uzavíratelných igelitových sáčcích odpovídající velikosti, aby se omezil přístup vzduchu a příjem vlhkosti z okolního prostředí.

Suchý vzorek byl následně namletý na mlýnku v laboratoři ČZU. Usušený materiál a substrát bylo potřeba mechanicky upravit kvůli následným analýzám. Rozbory ze sušiny si vyžadovaly surovinu ve formě malých částic a upravit vzorek na co nejvíce homogenní materiál. Při mletí docházelo zhruba k 50% ztrátě vzorku. Suché namleté vzorky byly uskladněny v laboratoři.



Obrázek 7 - Sušení vzorků při teplotě 30 °C po době měsíce

## 4.6 Hodnocené parametry

U všech vzorků vstupních materiálů, předkompostů i vermikompostů bylo hodnoceno pH, elektrická vodivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), celkový obsah uhlíku v %, fosforu, draslíku, hořčíku a vápníku v mg/l sušiny. Dále volně přístupné makroživiny pro rostlinu také v mg/l sušiny. Výsledky v mg/l byly podle množství navážky převedeny na mg/kg sušiny.

U vermikompostů byla stanovena hmotnost žížal v gramech a počet kokonů na půl kilogramu vermikompostu. Data o hmotnosti žížal byla převedena na g/kg vlhkého vermikompostu.

Druh vzorku pro rozbor:

- Čerstvý vzorek z lednice stanovení pH a elektrické vodivosti
- Usušený vzorek stanovení úbytku vlhkosti, sušiny, celkové obsahy makroživin a přístupné obsahy makroživin

## 4.7 Laboratorní analýzy

### 4.7.1 Stanovení pH a elektrické vodivosti

Pro stanovení pH a elektrické konduktivity bylo vždy naváženo 5 gramů čerstvého vzorku z lednice do plastové uzavíratelné zkumavky s kuželovitým dnem a zalito 25 ml demineralizované vody. Uzavřené zkumavky se ve stojánku umístily na třepací zařízení po dobu 10 minut. V promíchaných vzorcích bylo měřeno pH pomocí pH metru. Ten byl před každým měřením zkontrolován a v případě potřeby zkalibrován.

Po měření pH, pH metrem WTW pH 340i se zkumavky znovu uzavřely a po šesti vkládaly do odstředivky, která byla nastavena na 5000 ot/min po dobu pěti minut. Materiál byl odstředivou silou oddělen od kapaliny, která byla přefiltrována přes filtrační papír. V tomto roztoku se měřila elektrická konduktivita pomocí konduktometru WTW cond 730. Výsledky vycházely v  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 4.7.2 Metoda suchého rozkladu pro stanovení celkových obsahů makroprvků

Pro stanovení obsahu jednotlivých prvků byla využita metoda suchého rozkladu, která se skládá z procesu sušení, zuhelnatění, zpopelnění a loužení popela s přidávkem pomocného činidla a v případě vzorků obsahujících kal došlo k opakovanému zpopelnění a loužení.

Vzorky byly naváženy na analytických vahách. Navážka každého vzorku se připravovala do křemenných kádínek s vyrytými čísly pro označení, odolných vůči vysokým teplotám. Každý desátý vzorek byl slepý.

Navážené vzorky byly naskládány na plotýnku a přikryty ochrannými sklíčky (viz Obrázek 8). V první fázi byla teplota nastavena na 160 °C a každou následující hodinu upravena na 220 °C, 280 °C a naposledy na teplotu 350 °C. Celkem byly vzorky na plotýnce zahřívány 4 hodiny.



Obrázek 8 - První fáze suchého rozkladu – vzorky na plotýnce

Kádinky bez ochranných sklíček byly přesunuty do pece k pozvolnému vypalování, ke kterému došlo v průběhu 10 až 16 hodin, přes noc. Na pecích se nastavily programy určené k suchému rozkladu a další den ráno se vzorky z vypnuté pece vyjmuly a pracovalo se na nich dál.

Vzorky se nechaly vychladnout a do každého se aplikoval 1 ml  $\text{HNO}_3$ . Vzorky se potom položily na plotýnku umístěnou uvnitř digestoře. Kyselina byla odpařena při teplotě 120 °C. Odpaření trvalo zhruba 1 hodinu. Bylo nutné dosáhnout úplného vysušení vzorku. Následně byly kádinky pomocí kleští opět přesunuty do pecí. Tam byly ponechány další hodinu při teplotě 500 °C.

Vzorky bez kalu se nechaly vychladnout a byly převáděny do roztoku demineralizované vody a kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ). Uvedený roztok se připravoval v kádince o objemu 1 litr. Na dno kádinky byla napuštěna demineralizovaná voda, přidalo se 15,5 ml  $\text{HNO}_3$  a kádinka byla doplněna demineralizovanou vodou po rysku. Výsledný roztok se pomocí stříčky aplikoval do kádinky s popelem a s využitím ultrazvuku se kádinky vymývaly. Tímto způsobem byl z kádinek odebrán vysušený obsah zkoumaného materiálu a převeden do roztoku. Obsah kádinky se přelával do zkumavky o objemu 25 ml, která byla doplněna po rysku. Hrdlo zkumavky bylo zalepeno celofánem.

Vzorky s obsahem kalu se po druhém pobytu v peci nechávaly vychladnout a bylo do nich dávkováno 6 ml lučavky královské. Kádinky byly umístěny na plotýnku do digestoře a zahřívány při teplotě 160 °C, tak dlouho dokud nedošlo k odpaření lučavky královské a zhutnění materiálu. Kádinky se nechaly vychladnout a pomocí stříčky s demineralizovanou vodou a ultrazvuku se vyplachovaly, popel se převedl do roztoku a byl přelit do zkumavky o objemu 25 ml, která byla doplněna po rysku demineralizovanou vodou. Hrdlo zkumavky bylo zalepeno plastovou folií.

Prvky vápník, hořčík, fosfor byly měřeny na ICP OES a taktéž draslík byl měřen na zařízení FAAS neboli plamenový atomový absorpční spektrometr obě zařízení byly zakoupeny u firmy Amedis.

#### **4.7.3 Metoda CAT pro stanovení přístupného obsahu prvků**

Metoda CAT je určena pro stanovení volně přístupných prvků, nelze touto metodou stanovovat vápník. Zásobník roztok byl vytvořen pomalým zahříváním 800 ml demineralizované vody na teplotu 80 °C, kdy se přimíchalo 11,2 g  $\text{CaCl}_2$  a 7,88 g DTPA. Látky se postupně v demineralizované vodě rozpouštěly při teplotě 75 °C ± 10 °C po dobu dvou hodin, při stálém míchání. Roztok byl po vychladnutí doplněn do objemu 1 l demineralizovanou vodou.

Jednotlivé suché a nadrcené vzorky byly naváženy na 3,0 g do zkumavky s kuželovitým dnem. Roztok CAT bylo potřeba před smísením se vzorkem znovu naředit, a to v poměru 1:9 s demineralizovanou vodou. Vznikl výsledný koncentrát aplikovatelný na suchý vzorek. Zkumavky se vzorkem a roztokem byly uzavřeny víčkem a umístěny ve stojanu na třepací zařízení po dobu jedné hodiny. V následujícím kroku byly vzorky odstředěny pomocí odstředivky o rychlosti 6000 ot/min v čase 15 minut. Odstředěné vzorky byly přefiltrovány přes filtrační papír do plastových zkumavek. Obsah hořčíku, draslíku a fosforu byl stanoven zařízením ICP OES stejně jako vzorky ze suchého rozkladu.

#### 4.7.4 Metoda prvkové elementární analýzy

Tato metoda byla využita pro stanovení obsahu uhlíku, vodíku, dusíku a síry v organické matici. Při této metodě byl kladen především důraz na precizní provedení a čistotu pracoviště. Vzorek se navažoval do hliníkových kalíšků určených ke spalování společně s materiálem. Do kalíšku se navažoval suchý, nadcený vzorek přibližně kolem hmotnosti 20 mg. Vzorek byl pomocí pinzet zabalen do folie, ze které byl vyrobený kalíšek.

Balení muselo mít kulovitý tvar a nesmělo docházet k odpadávání částic z balíčku. Během navažování nesmělo dojít ke kontaminaci hliníkových folií z venku dávkovaným vzorkem, vlhkostí nebo špínou z rukou. Pracoviště bylo pravidelně dezinfikováno, byly používány rukavice, pinzety a speciální lžička na dávkování. Takto připravený materiál byl analyzován pomocí takzvané technologie Advanced Purge and Trap. Do zařízení Vario MARCO Cube byl postupně dávkován materiál a docházelo k vysokoteplotnímu spalování při teplotách vyšších než 1000 °C za přítomnosti kyslíku. Během spalování se zkoumala oxidující směs obsahující oxid uhlíčitý, vodu, oxid siřičitý a oxidy dusíku. Oxidy dusíky vzniklé během procesu spalování byly následně v redukční peci převedeny na elementární plynný dusík. Dále došlo ke stanovení složení vzniklých spalin pomocí oddělení jednotlivých složek spalin a následně proběhla kvantifikace pomocí tepelně vodivostního detektoru.

#### 4.7.5 Statistické vyhodnocení dat

Základní vyhodnocení dat jako průměr a směrodatná odchylka bylo provedeno v programu Excel od Microsoft office. Průměr byl spočítán vždy z opakování dané varianty při každém odběru, a tento proces se opakoval pro každý naměřený údaj jako obsah prvku, pH, hmotnost žížal. Dále se obdobnou metodou stanovily průměry teplot za každý den z jednotlivých aerobních fermentorů při předkompostování. Výsledné průměry společně se směrodatnými odchylkami byly zapracovány do výsledků diplomové práce.

Konkrétní statistické testy byly provedeny v programu MATLAB. Záměrem bylo statistické zhodnocení rozdílu teplot mezi jednotlivými variantami pomocí ANOVA testu:

- $H_0$ : Vzorky pochází z rozdělení se stejnými průměry (není zde statisticky významný rozdíl mezi teplotami jednotlivých variant poměru kalu a pelet).
- $H_1$ : Vzorky nepochází z rozdělení se stejnými průměry (je zde statisticky významný rozdíl mezi teplotami jednotlivých variant poměru kalu a pelet).

Nejprve byly otestovány předpoklady dané metody – normalita dat a shodnost rozptylů. Jako test normality byl zvolen Shapiro-Wilkův test s hladinou statistické významnosti  $\alpha = 5 \%$ .

- $H_0$ : data pochází z normálního rozdělení.
- $H_1$ : data nepochází z normálního rozdělení.

Pokud data splňovala normalitu, byla otestována shodnost rozptylů pomocí Bartlettova testu s hladinou statistické významnosti  $\alpha = 5 \%$ .

- $H_0$ : data pochází z normálního rozdělení se stejným rozptylem.
- $H_1$ : data nepochází z normálního rozdělení se stejným rozptylem.

Pokud nebyly splněny předpoklady ANOVA byla využita neparametrická obdoba testu – Kruskal-Wallisův test.



- $H_0$ : Rozložení teplot jednotlivých skupin pochází ze stejného rozložení/teploty se mezi skupinami neliší.
- $H_1$ : Rozložení teplot jednotlivých skupin nepochází ze stejného rozložení/teploty se mezi skupinami liší.

V případě zamítnutí nulové hypotézy byl využit post-hoc Tukey's HSD test pro určení signifikantních rozdílů mezi určitými variantami.

Hmotnost a počet žížal byl testován také testem normality Shapiro-Wilkův u průměrných údajů variant 11 a 12. Tím došlo k posouzení normality s hladinou statistické významnosti  $\alpha = 5 \%$ .

- $H_0$ : data pochází z normálního rozdělení.
- $H_1$ : data nepochází z normálního rozdělení.

Dále na základě výsledku normality se testovalo pomocí Spearmanova nebo Pearsonova korelačního koeficientu.

#### 4.7.6 Značení vyhodnocených dat

Pro jednotné porovnání předkompostování a vermikompostování je zde Tabulka 20, která upravuje finální označení variant a sjednocuje ho, pro potřeby dalších grafických znázornění.

Tabulka 20 - Označení jednotlivých variant

| <b>Aerobní fermentor</b> | <b>Finální značení variant</b> |
|--------------------------|--------------------------------|
| 1 + 7                    | 8                              |
| 2 + 8                    | 9                              |
| 3 + 9                    | 10                             |
| 4 + 10                   | 11                             |
| 5 + 11                   | 12                             |

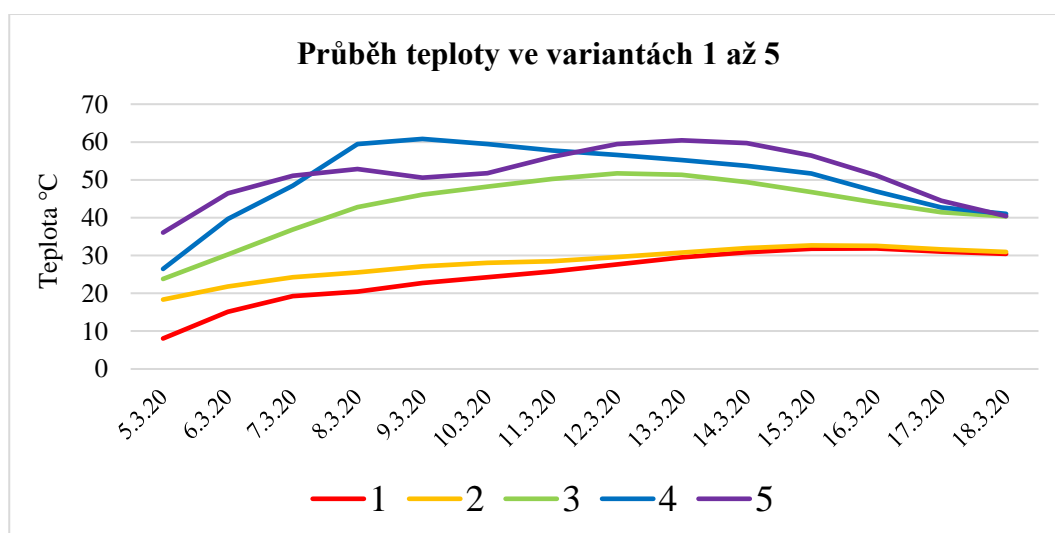
## 5 Výsledky

### 5.1 Předkompostovní

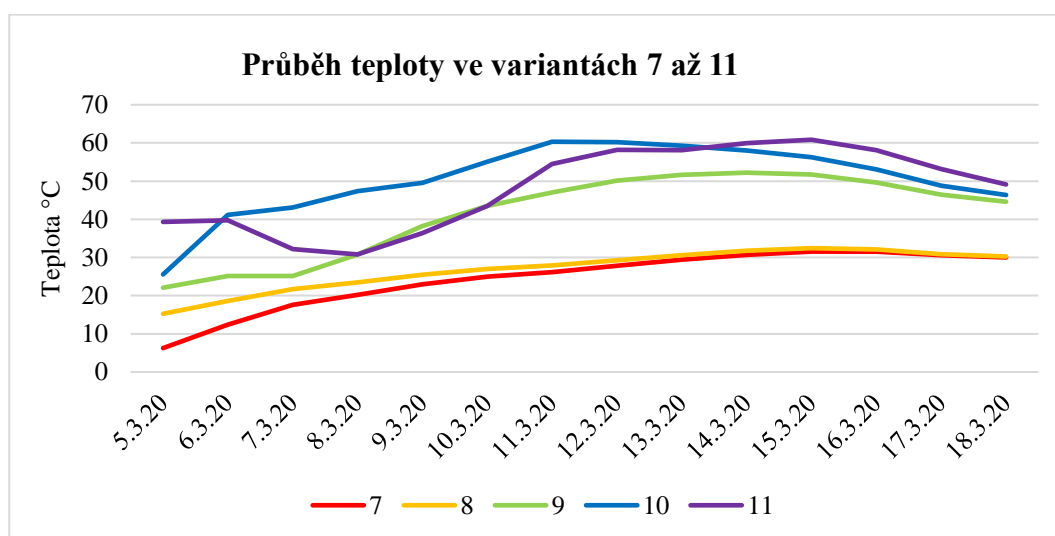
#### 5.1.1 Teplota

V časových intervalech po jedné hodině byla snímána teplota předkompostovaného materiálu. Pro potřeby zpracování výsledků byla denní teplota zprůměrována a vývoj teplot u jednotlivých variant je možné vidět na Grafu 1 a 2. Teplota předkompostovaných surovin se pohybovala od 8 do 61 °C. Teplotu 60 °C přesáhly vzorky 4, 5, 10 a 11. Teplota u variant 1, 2, 7 a 8 měla vzrůstající charakter a měřicí zařízení nezaznamenalo žádné velké výkyvy.

Varianty s větší příměsí slaměných pelet dosahují vyšších teplot. Varianty 3 a 9 byly namíchany v poměru 2:2 (kal, slaměné pelety) a následují trend vzrůstající teploty bez významných výkyvů pouze ve vyšším teplotním pásmu než varianty s nižším obsahem slaměných pelet.



Graf 1 - Průběh teploty při předkompostování ve variantách 1 až 5 ve °C



Graf 2 - Průběh teploty při předkompostování ve variantách 7 až 11 ve °C

Vzhledem k předpokládané hypotéze a to konkrétně, že nejvyšší teploty budou dosahovat varianty pouze s peletami, jak můžete vidět v Grafu 1 a 2 varianta 4 a 10 jsou v poměru 1:3 (kal, slaměné pelety) a varianta 5 a 11 jsou ze slaměných pelet. Nejvyšší dosažená průměrná denní teplota a to  $60,8 \pm 0,4$  °C byla zaznamenána ve variantě 11 dne 15.3.2020.

Pro posouzení jsou aerobní fermentory hodnoceny mezi sebou. Při pohledu na získané teploty ze sudu 4 a 10 jsou zde patrné zřejmé rozdíly. Varianta 4 měla prudký nárůst teploty a dosáhla teplotního vrcholu 9.3.2020 a pak začala teplota postupně klesat. Varianta 10 měla prudký nárůst v prvních třech dnech, následoval pozvolný vývoj teploty do maxima průměrné denní teploty  $60,3 \pm 0,1$  °C dne 11.3.2020. Aerobní fermentor 10 pouze jako jediný dosáhl průměrné denní teploty nad 60 °C po dvou po sobě jdoucích dnech. Průměrná teplota varianty 4 byla  $51,3 \pm 8,8$  °C a varianty 10 je  $51,4 \pm 8,6$  °C.

Společný znak projevily varianty 5 a 11 v poklesu teplot po začátku předkompostování. Mnohem zřetelnější byl tento pokles u varianty 11 a díky tomu tato varianta dosáhla teplotního maxima nejpozději, ale naopak s nejvyšší teplotou, jak bylo uvedeno v předchozím odstavci. Průměrná teplota varianty 5 je  $52,3 \pm 6,7$  °C a varianty 11 je  $48,4 \pm 11,3$  °C. U teploty je logická vyšší směrodatná odchylka, protože substrát byl vkládán do aerobních kompostérů při laboratorní teplotě a v některých variantách došlo k rychlému nárůstu.

#### 5.1.1.1 Statistické šetření

Normalita shromážděných teplot z předkompostování v jednotlivých variantách byla testována pomocí Shapiro-Wilkova testu normality s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Nulová hypotéza  $H_0$ : shromážděná data pochází z normálního rozdělení. Získané P hodnoty a W statistiky jsou v Tabulce 21.

Testovaná statistika W pro teploty naměřené u skupiny 1,  $W_{(309)} = 0,89$ ;  $p < 0,05$ ; nulová hypotéza je tedy zamítnuta a vzorky nepochází z normálního rozdělení.

Z Tabulky 21 je zřejmé, že všechny naměřené teploty nepochází z normálního rozdělení.

Tabulka 21 - Statistické šetření normality dat Shapiro-Wilkovým testem normality

| Statistika   | Předkompostování – aerobní fermentory |         |         |         |         |
|--------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|              | 1                                     | 2       | 3       | 4       | 5       |
| P hodnota    | < 0.001                               | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| W statistika | 0,89                                  | 0,91    | 0,88    | 0,88    | 0,88    |
| Statistika   | Předkompostování – aerobní fermentory |         |         |         |         |
|              | 7                                     | 8       | 8       | 10      | 11      |
| P hodnota    | < 0.001                               | < 0.001 | 0       | < 0.001 | < 0.001 |
| W statistika | 0,86                                  | 0,89    | 0,89    | 0,86    | 0,88    |

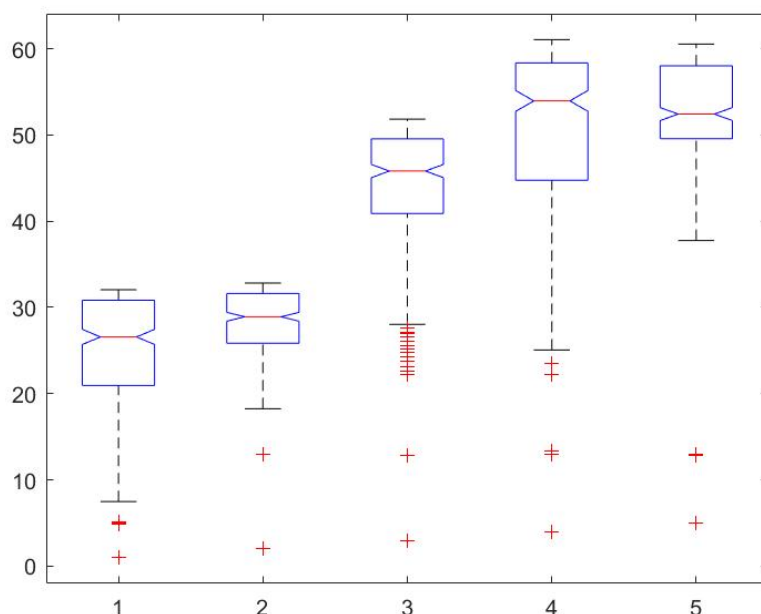
Jelikož u všech dat bylo prokázáno, že nepochází z normálního rozdělení, byla data testována Kruskal-Wallis ANOVA testem, pro ověření, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými skupinami, pro které byly měřeny teploty. Tento test byl zařazen pro porovnání variant a pro ověření hypotézy 1.

$H_0$ : Rozdělení teplot jednotlivých skupin pochází ze stejného rozdělení / teploty se mezi skupinami neliší.

$H_1$ : Rozložení teplot jednotlivých skupin nepochází ze stejného rozdělení / teploty se mezi skupinami liší.

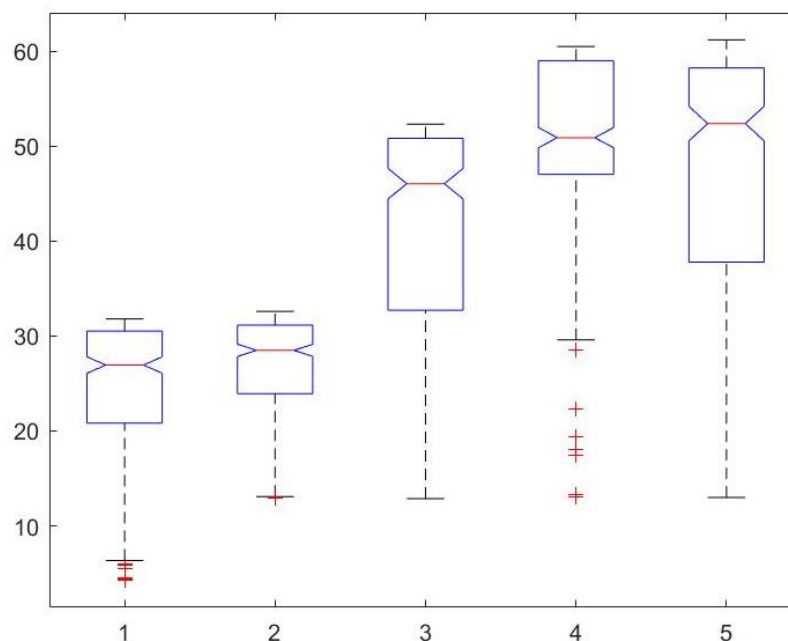
První byla testována skupina aerobních fermentorů 1 až 5 kde  $H_{(5)} = 1097,74$ ;  $p < 0,001$ ; zamítáme tedy nulovou hypotézu a lze rozlišit významné rozdíly mezi teplotami. Jako post-hoc test byl využit Tukey's HSD test, který ukázal, že průměry skupin 1 a 3, 4, 5 jsou signifikantně rozdílné;  $p < 0,001$ . Také průměry skupin 2 a 3, 4, 5 byly signifikantně rozdílné;  $p < 0,001$ .

Průměry skupin jsou signifikantně rozdílné mezi skupinami 3 a 4, 5;  $p < 0,001$ . Nebyl tedy nalezen statisticky významný rozdíl mezi variantami 1 a 2 a poté mezi variantami 4 a 5 (viz Obrázek 9).



Obrázek 9 - Boxplot graf teplot variant 1 až 5 při předkompostování na ose y °C

Stejně byla testována i druhá skupina aerobních fermentorů varianty 7 až 11, kdy došlo opět k zamítnutí  $H_0$  a lze odlišit významné rozdíly mezi teplotami. Post hoc Tukey test ukázal, že průměry skupin 7 až 9, 10, 11 jsou signifikantně rozdílné;  $p < 0,001$ . Tento závěr platí i pro varianty 8, 9, 10, 11 i pro skupiny 9 a 10, 11. Statisticky významný rozdíl nebyl nalezen mezi skupinami 7 a 8 a mezi variantami 10 a 11 (viz Obrázek 10). Na Obrázku 10 označení 1 až 5 odpovídá právě variantám 7 až 11.



Obrázek 10 - Boxplot teplot variant 7 až 11 při předkompostování na ose y °C

## 5.2 Změna agrochemických parametrů během předkompostování a vermikompostování

### 5.2.1 pH

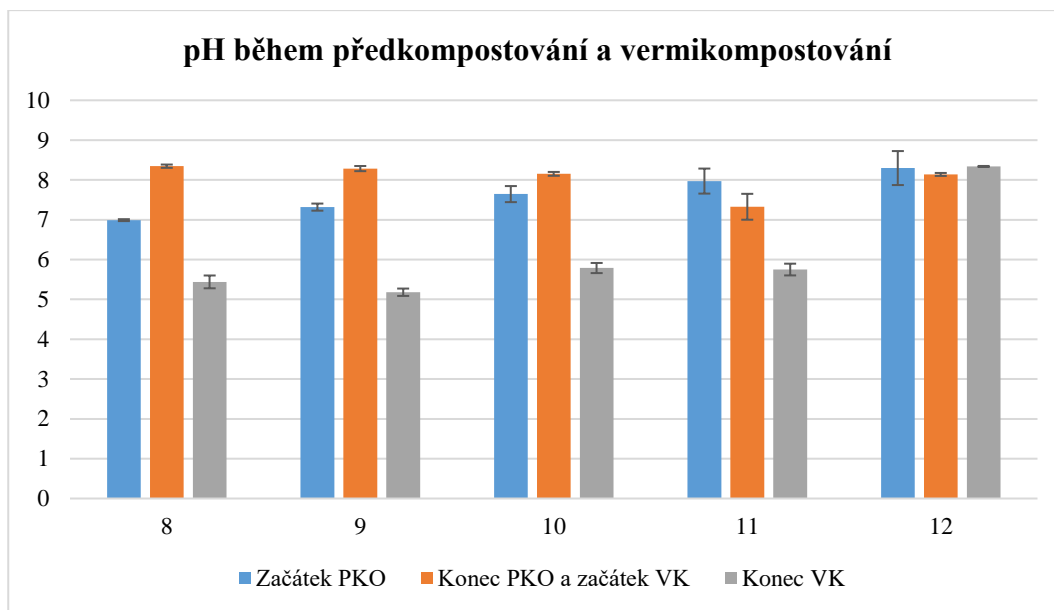
pH jednotlivých opakování variant bylo naměřeno pH metrem a spočteno jako průměr výsledků dané skupiny a jejích opakování. To znamená, že z pH variant 8A, 8B a 8C byl vypočten průměr a směrodatná odchylka.

Graf 3 ukazuje průběh změny pH. U vzorků s vyšším nebo rovnoměrným obsahem kalu vůči slaměným peletám došlo při předkompostování (PKO) ke zvýšení hodnoty pH, tam kde převažovaly slaměné pelety došlo k mírnému poklesu pH.

Varianta 8 je samotný kal s průměrnou hodnotou  $\text{pH } 6,99 \pm 0,02$ , pH čistých pelet bylo  $8,30 \pm 0,43$ , jedná se tedy o vzorek zásaditý. Tak jak byl dávkován přírůstek slaměných pelet do kalu docházelo ke zvyšování pH.

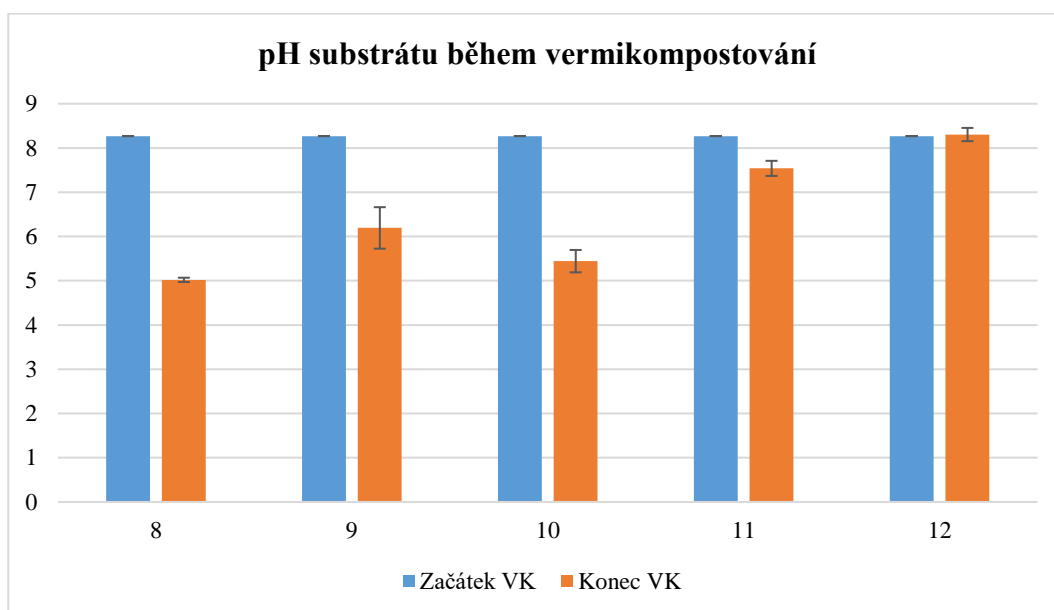
Po předkompostování byly všechny vzorky kromě varianty 11 na stupnici pH hodnoceny jako zásadité. S těmito hodnotami potom byly varianty připraveny na vermikompostování (VK). Pro vyhodnocení hypotézy, že změna agrochemických parametrů při PKO bude dosahovat větších změn, než VK je v Grafu 3 také sloupec obsahující hodnoty pH po ukončení VK.

U variant 8, 9, 10 a 11 došlo během VK k poklesu pH na stupnici do kategorie kyselé. Hodnoty se pohybovaly od 5,18 do 5,79. Ke zvýšení pH došlo pouze u vermikompostování slaměných pelet, které měly na konci předkompostování hodnotu  $\text{pH } 8,14 \pm 0,04$  a na konci VK narostla hodnota na  $8,34 \pm 0,01$  to je ještě o 0,04 více než měl materiál na začátku předkompostování.



Graf 3 - pH během předkompostování a vermikompostování

Dále je nutné srovnat hodnoty pH v substrátu během vermikompostování. Změna pH v substrátu 8, 9, 10 a 12 měla obdobný průběh jako u vermikompostování zkoumaného materiálu (viz Graf 4). U vzorků 11 došlo taky k poklesu hodnoty pH, ale ne tak výrazně jako u kalu se slaměnými peletami.

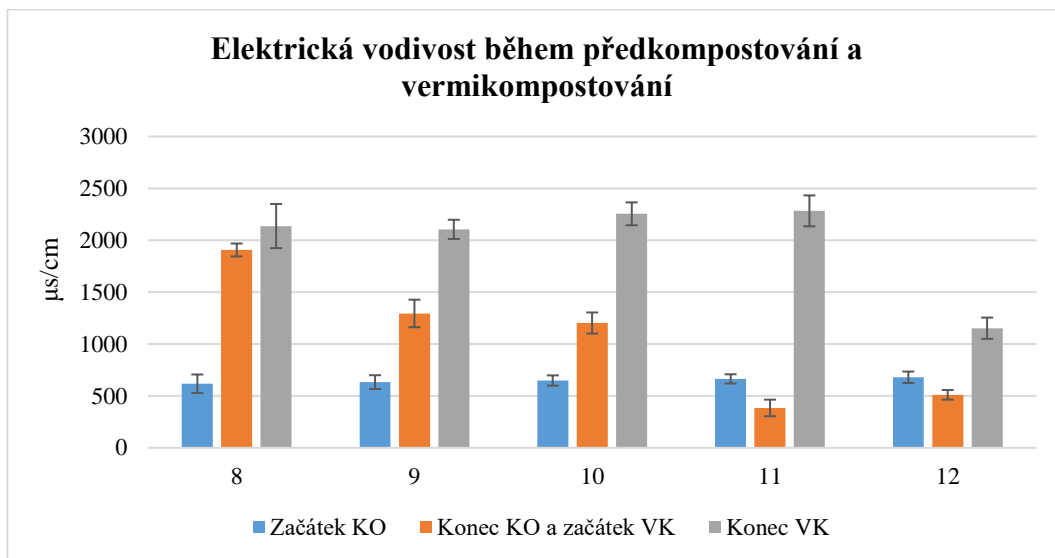


Graf 4 - pH substrátu během vermikompostování

## 5.2.2 Elektrická vodivost

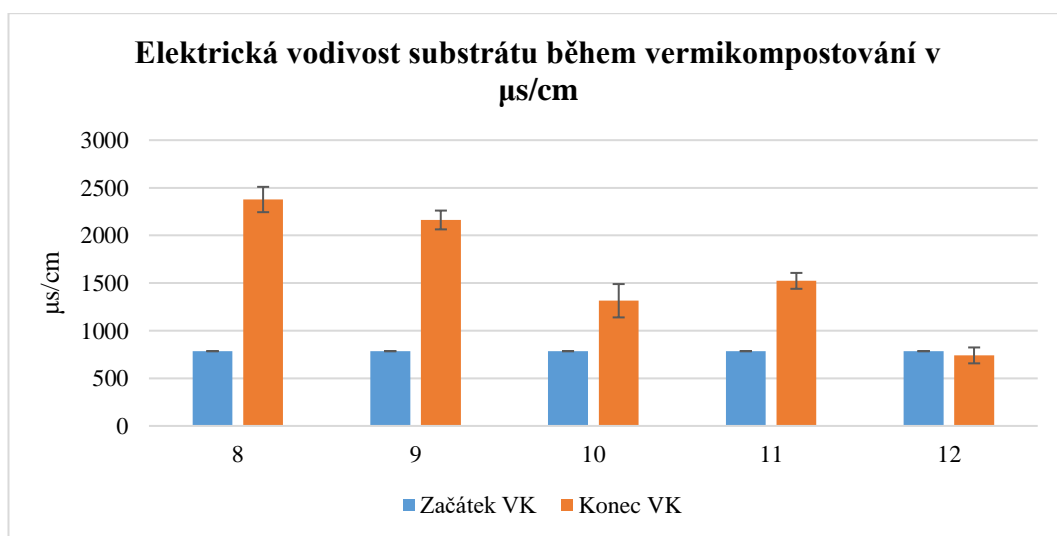
Jak lze vidět v Grafu 5 před a po předkompostování varianty obsahující 100 až 50 % kalu měly na elektrické vodivosti významný nárůst. Varianta 8 měla počáteční elektrickou vodivost  $617,33 \pm 89,34 \mu\text{s/cm}$ , po předkompostování 100% kal dosáhl hodnoty  $1906,00 \pm 62,33 \mu\text{s/cm}$  a na závěr vermikompostování byla elektrická vodivost  $2136,50 \pm 212,74 \mu\text{s/cm}$ .

Zatímco u vzorků, které obsahovaly 75 % a 100 % pelet elektrická vodivost během PKO klesla a během VK vzrostla.



Graf 5 - Elektrická vodivost během předkompostování a vermikompostování v  $\mu\text{s/cm}$

Elektrická vodivost substrátu se u varianty 12 podle Grafu 6 zásadně nezměnila. Ve zmíněné variantě došlo k poklesu z původní hodnoty o  $44,33 \mu\text{s/cm}$ . Zbylým variantám elektrická vodivost vzrostla. Nejvíce se nárůst projevil u varianty 8. Parametr byl sledován na začátku a konci časového intervalu 4 měsíců což odpovídá době vermikompostování.

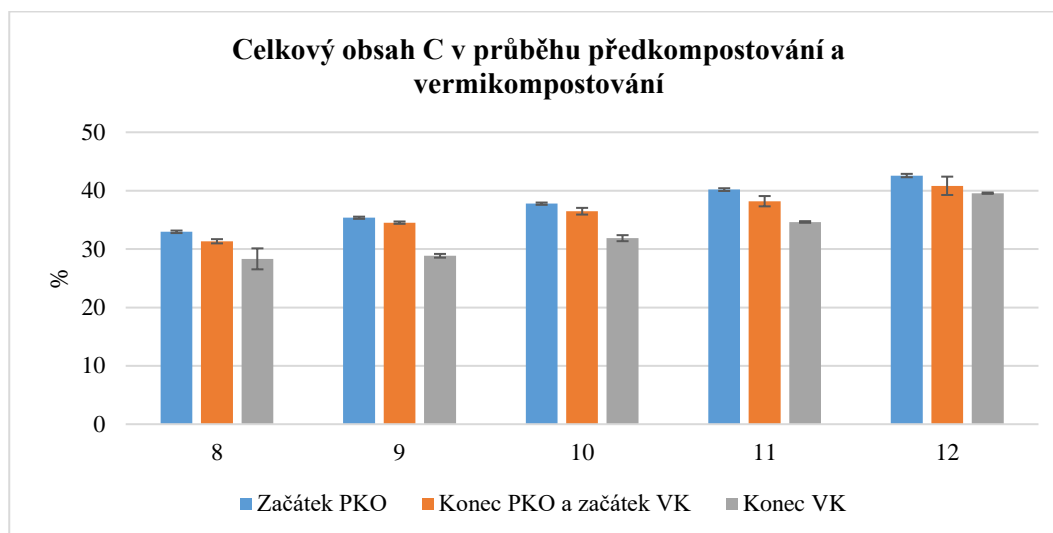


Graf 6 - Elektrická vodivost substrátu během vermikompostování v  $\mu\text{s/cm}$

### 5.2.3 Uhlík (C)

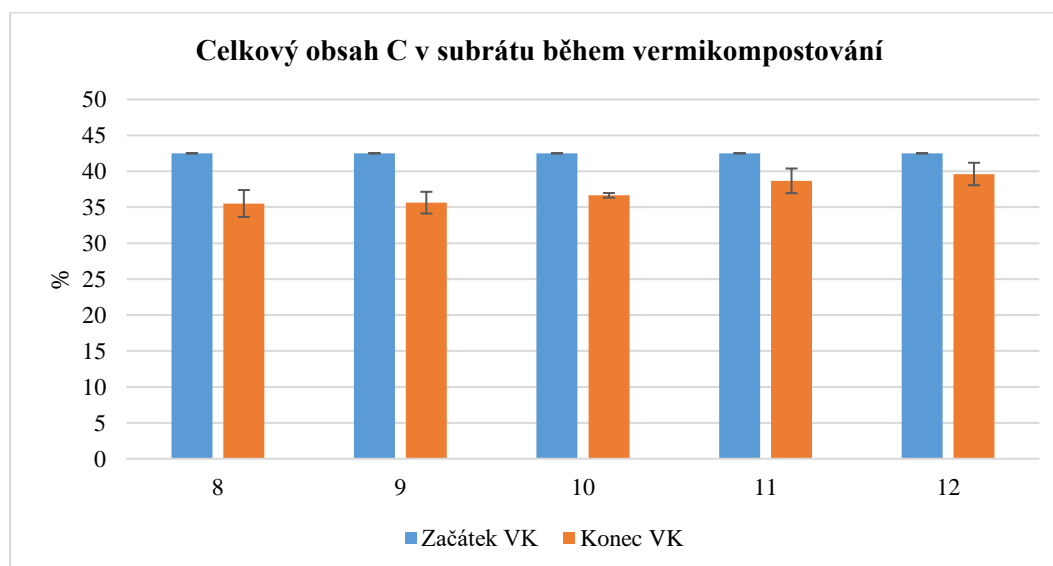
Neupravený 100% kal měl procentuální zastoupení uhlíku v sušině  $32,95 \pm 0,21 \%$ , přidáváním pelet se do substrátu dostal další uhlík, jelikož u čistých pelet před předkompostováním byla naměřena hodnota  $42,59 \pm 0,29 \%$  uhlíku. Předkompostování celkový obsah uhlíku v sušině výrazně nezměnilo.

Znatelněji na materiály působilo VK. V Grafu 7, můžete vidět větší přeměny během VK. Nejmenší transformace od začátku PKO po konec VK byla u vzorku 12. Počáteční hodnota  $42,59 \pm 0,29 \%$  C klesla na  $39,57 \pm 0,11 \%$  C.



Graf 7 - Uhlík v průběhu předkompostování a vermikompostování v %

Uhlík v substrátu během vermikompostování je vyobrazen na Grafu 8. Mezi všemi kategoriemi v časovém intervalu došlo k poklesu počáteční hodnoty uhlíku, která je vyčíslena v procentech. Z počáteční hodnoty  $42,51 \%$  uhlíku došlo k poklesu na hodnoty od  $35,52 \pm 1,87$  do  $39,63 \pm 1,57 \%$  uhlíku.



Graf 8 - Uhlík v substrátu během vermikompostování v %

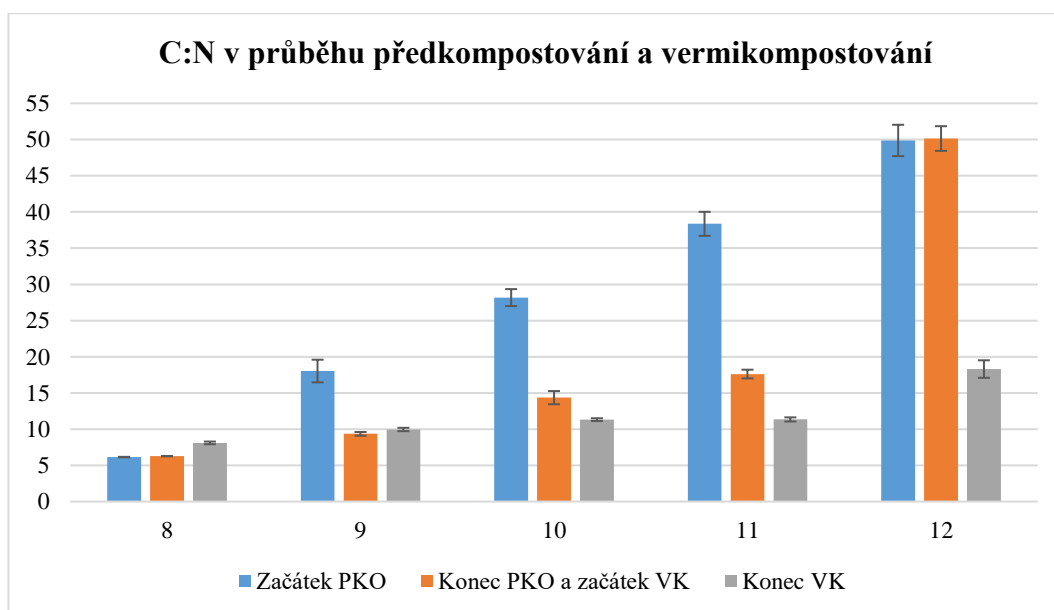


#### 5.2.4 Poměr uhlíku a dusíku (C:N)

Poměr C:N je důležitým ukazatelem při předkompostovacím procesu. Z Grafu 9 lze vypočítat, že u varianty 8 došlo k nejmenším změnám a jako jediná měla tato varianta vzrůstající tendenci z počátečních  $6,14 \pm 0,03$  se v průběhu PKO dostala na hodnotu  $6,27 \pm 0,01$  a následně na konci VK C:N činilo  $8,10 \pm 0,19$ . S případkem slaměných pelet docházelo k navyšování poměru C:N.

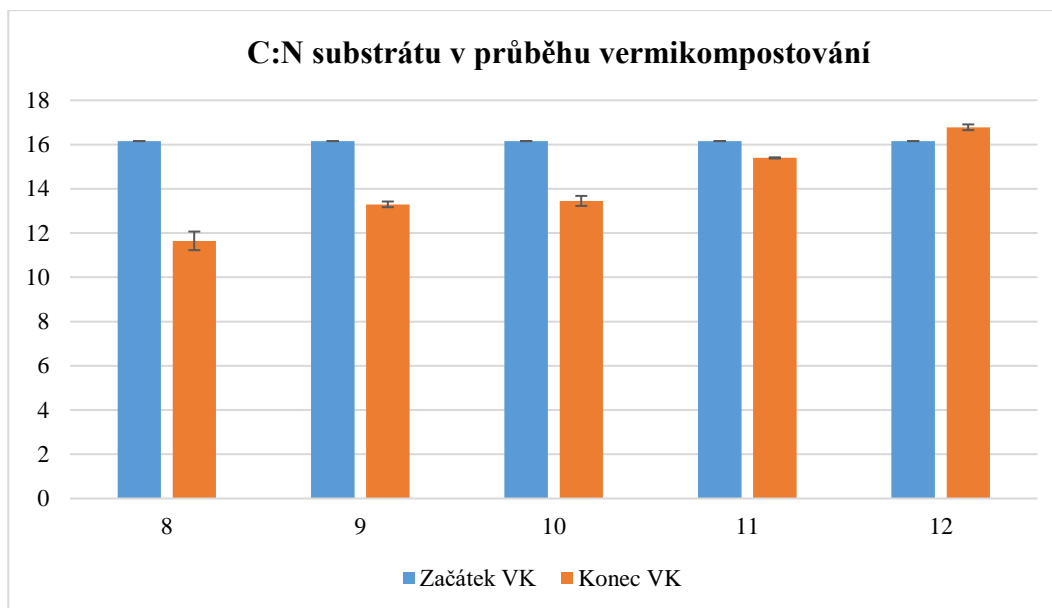
U vzorků 9, 10 a 11 došlo k větším změnám zkoumaných hodnot během předkompostování, a to k poklesu. Varianta 9 si během VK držela stabilní hodnotu a příliš se neměnila. Co do chování a poklesu poměru C:N jsou si velice podobné skupiny 10 a 11. Na začátku PKO měly nejbližší k ideálnímu poměru 35:1, za 14 dní předkompostování se varianta 10 z původních  $28,17 \pm 1,17$  snížila na  $14,35 \pm 0,91$  a během VK na  $11,32 \pm 0,19$ . Vstupní parametr skupiny vzorků 11 byl  $38,36 \pm 1,66$ , poklesl na  $17,61 \pm 0,60$  a dále poklesl při VK na  $11,34 \pm 0,28$ .

Dalším extrémem je průběh rozkladu 100% pelet. Minimální změna C:N během PKO a významné snížení při VK. Počáteční hodnota před předkompostováním byla  $49,88 \pm 2,16$  a na konci VK kleslo C:N na  $18,30 \pm 1,21$ .



Graf 9 - C:N v průběhu předkompostování a vermikompostování

Vyhodnocení parametru C:N pro substrát během vermikompostování je zpracováno v Grafu 10. Počáteční stav materiálu byl analyzován s výslednou hodnotou 16,16, to odpovídá neupravenému substrátu na začátku vermikompostování. U variant 8, 9, 10 a 11 došlo k poklesu. Nejvíce se poměr snížil u varianty 8 na poměr  $11,65 \pm 0,42$  C:N. S přírůstkem slaměných pelet ve vermikompostovaných dávkách se pokles snižoval a ve variantě 12, která je složena pouze ze slaměných pelet došlo k navýšení od původní hodnoty o 0,62.

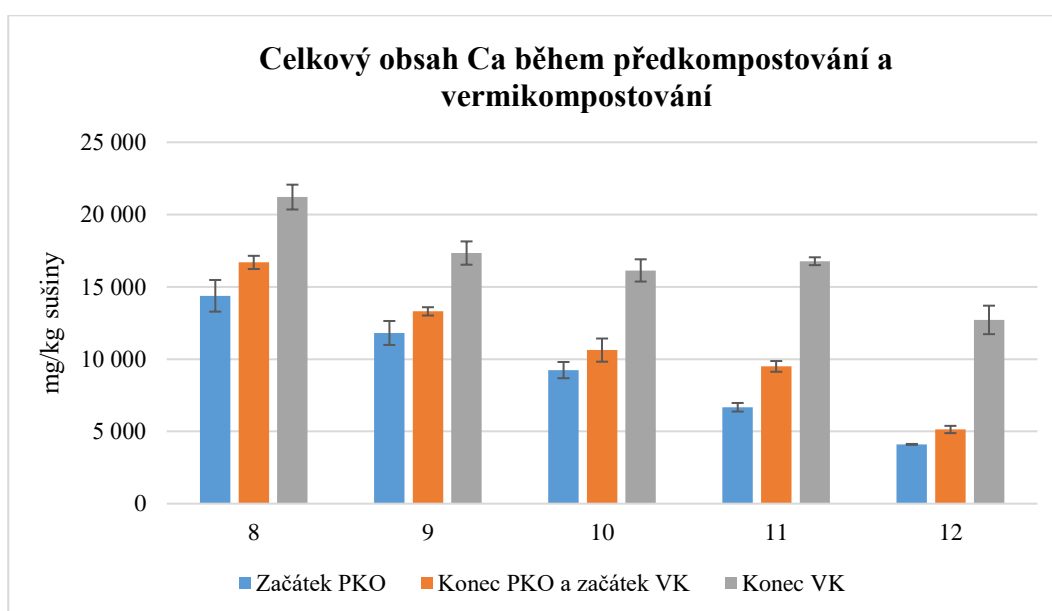


Graf 10 - C:N substrátu během vermikompostování

## 5.2.5 Makroživiny

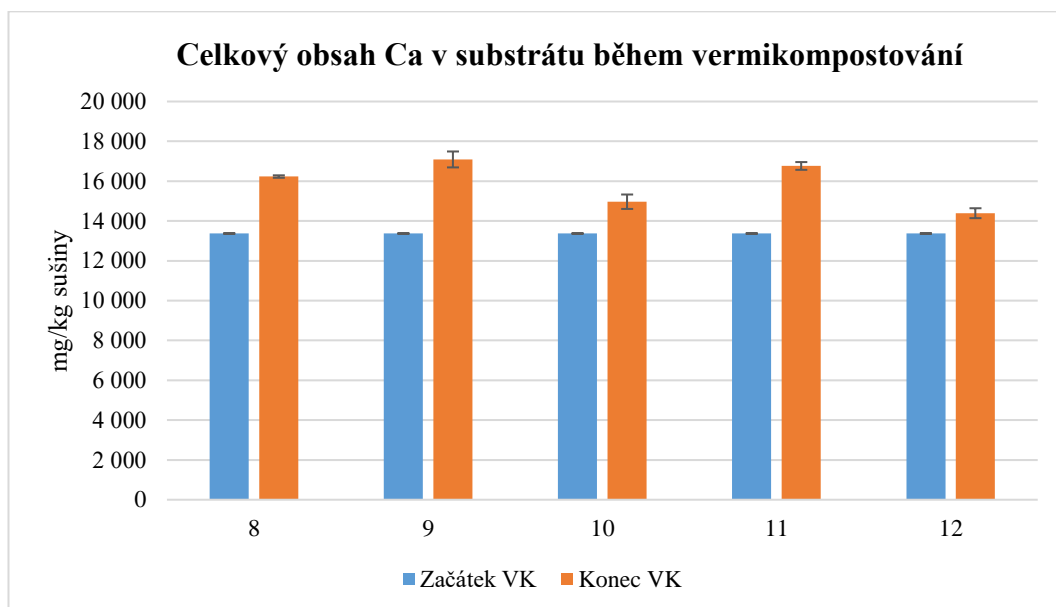
### 5.2.5.1 Vápník (Ca)

Obsah vápníků v sušině byl stanoven pomocí metody suchého rozkladu. Průběžný vývoj obsahu vápníku byl ovlivněn procesem předkompostování a vermikompostování (viz Graf 11). Složení upravovaného materiálu realisticky odpovídá vývoji v grafu. Největší množství Ca bylo na začátku úpravy ve vzorcích 8, které dosahovaly průměrné hodnoty  $14378,8 \pm 1094,1$  mg/kg sušiny. V každé variantě byl zaznamenán nárůst obsahu vápníku, a to převážně během VK. Varianta 12 chudá na vápník před jakoukoliv úpravou měla obsah  $4099,4 \pm 32,3$  a při ukončení pokusu byl výsledek  $12711,1 \pm 986,23$ .



Graf 11 – Celkový obsah Ca během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny

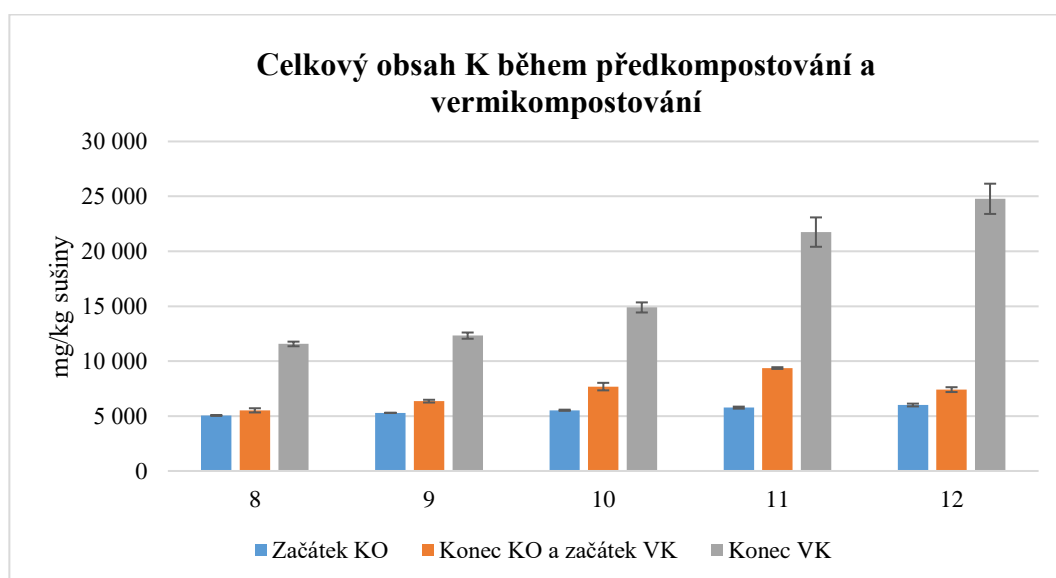
Celkový obsah vápníku v substrátu v suché hmotnosti v mg na kg je uveden v Grafu 12. Substrát v suché podobě na začátku vermikompostování obsahoval 13370,65 mg/kg vápníku. K nejmenším nárůstům došli u varianty 10 na  $14966,59 \pm 362,56$  a 12 na  $14390,99 \pm 248,36$  mg/kg. Zbylé varianty vzrostly měly nad 16000 mg/kg vápníku.



Graf 12 – Celkový obsah Ca v substrátu během vermikompostování

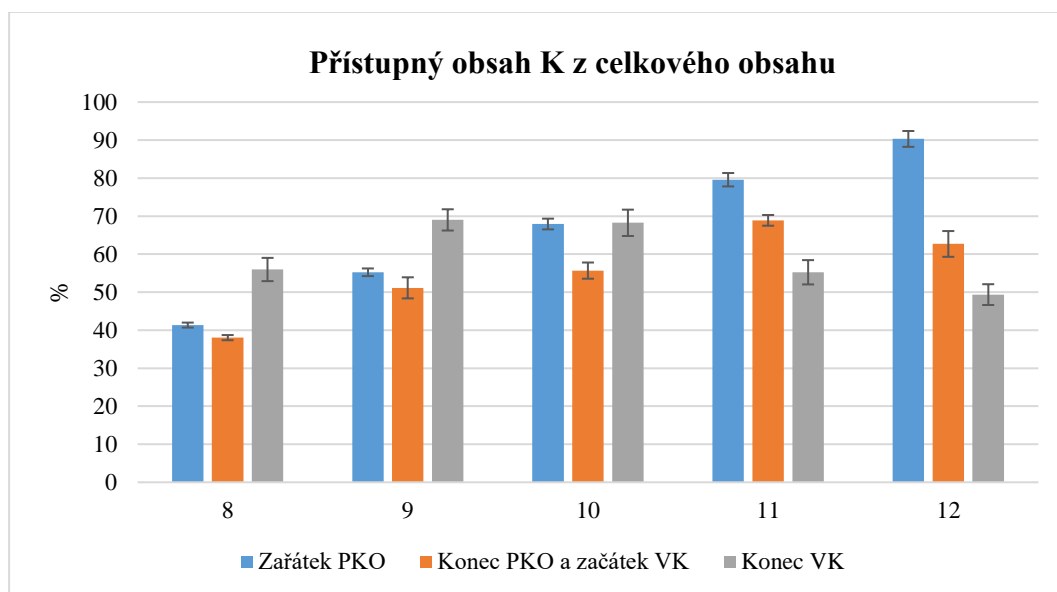
#### 5.2.5.2 Draslík (K)

Výsledky měření celkového obsahu draslíku v sušině jsou uvedeny v Grafu 13. Zakládky před předkompostováním dosahovaly hodnot od  $5055,11 \pm 24,94$  mg/kg Ca ve variantě 8 po nejvyšší hodnotu u čistých slaměných pelet  $6005,40 \pm 128,34$  mg/kg draslíku v sušině. Draslík byl nejvíce uvolněn ve variantě 12, celkem vzrostl draslík o  $18773,22$  mg/kg.



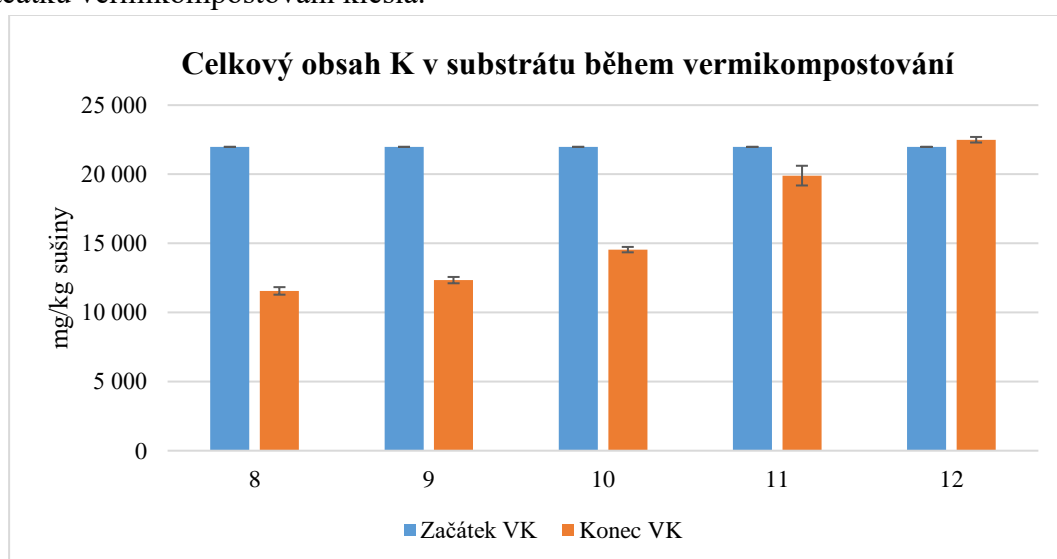
Graf 13 -Celkový obsah K během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny

Důležité je nahlédnout na zastoupení draslíku, které může přejít do půdního roztoku a je tak přístupné rostlině. V Grafu 14 je procentní zastoupení prvku, které se z celkového obsahu v sušině uvolnilo během měření do výluhu CAT. U stanovení celkového obsahu K byl u všech variant pozorován nárůst, zejména při VK. Přístupný draslík se chová zřetelně jinak než celkový obsah. Ve všech vzorcích došlo při PKO k poklesu přístupnosti. Tento stav byl změněn u vzorků 8, 9 a 10 během VK. Obsahy ve vzorcích 11 a 12 pokračovaly i při VK v klesajícím trendu. Na konci úpravy byl tak pro rostliny nejvíce přístupný draslík ve vzorku 10, celkově ho do výluhu CAT přešlo  $68,24 \pm 3,46 \%$ .



Graf 14 – Přístupný obsah K v % z celkového obsahu

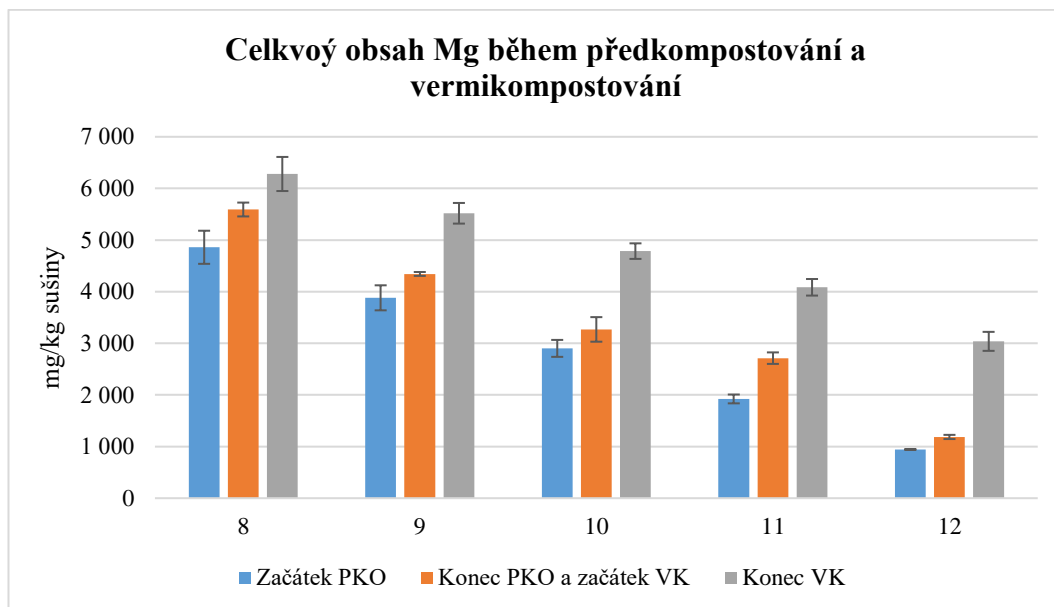
Celkový obsah draslíku v substrátu je v Grafu 15. Před vermikompostováním měl substrát celkový obsah 21982 mg/kg vápníku v sušině. S přidavkem slaměných pelet se rozdíl na začátku a konci vermikompostování zmenšoval a stejně jako u vápníku došlo ve variantě 12 k nárůstu konkrétně o 515,78 mg/kg draslíku. Průměrná hodnota u variant 8 až 11 pak od začátku vermikompostování klesla.



Graf 15 - Celkový obsah K v substrátu během vermikompostování mg/kg sušiny

### 5.2.5.3 Hořčík (Mg)

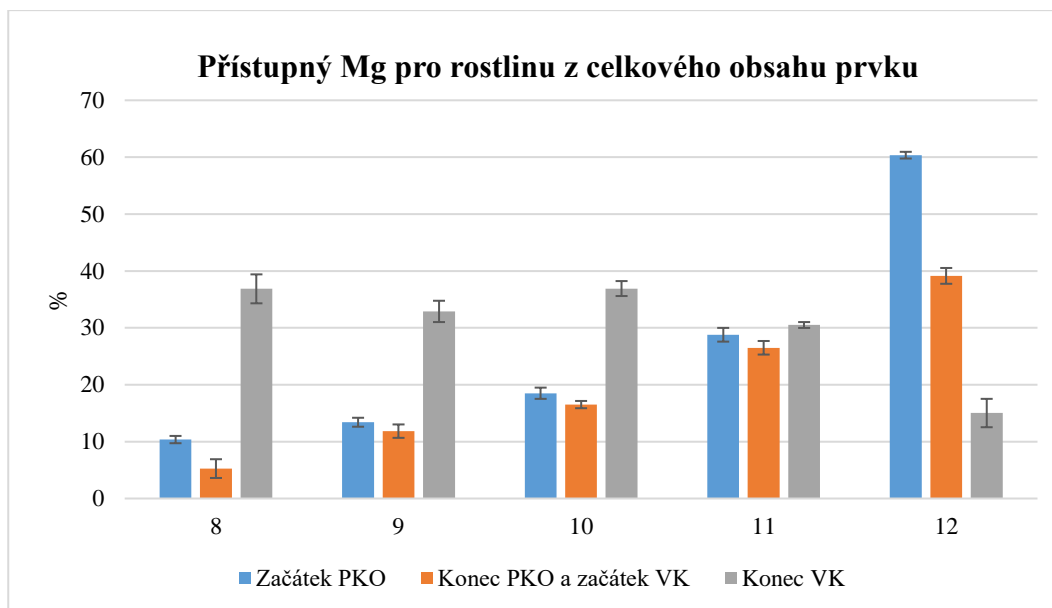
Celkový obsah hořčíku měl obdobný průběh jako vývoj draslíku s tím rozdílem, že obsahy se v jednotlivých druzích materiálu před úpravami výrazně lišily (viz Graf 16). Největší obsah hořčíku byl v neupraveném materiálu naměřen ve variantě 8 a průměrná hodnota byla  $4860,02 \pm 320,70$  mg/kg naopak slaměné pelety měly průměr  $943,35 \pm 9,52$  mg/kg hořčíku. Ke zřetelnější změně parametru došlo během VK než v případě PKO.



Graf 16 – Celkový obsah Mg během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny

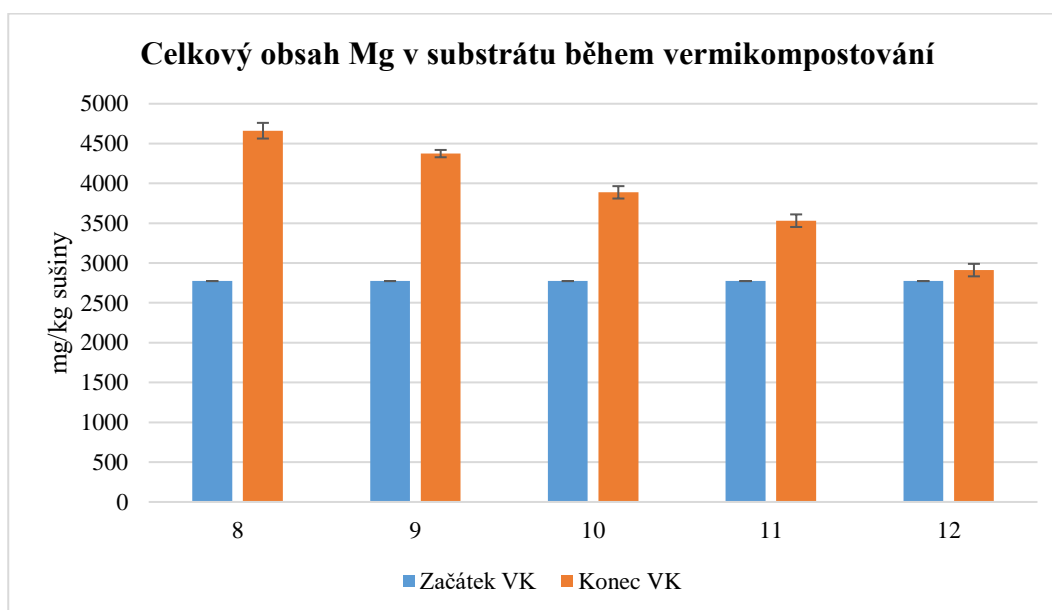
Již bylo naznačeno, že vysoký obsah prvku v sušině nezaručuje přístupnost prvku pro rostlinu. To potvrzuje testování přístupnosti hořčíku pro rostlinu podle Grafu 17. Varianta 8 měla na začátku úprav celkový obsah hořčíku  $4860,02 \pm 320,70$  mg/kg a z něj bylo pro rostlinu přístupných  $10,36 \pm 0,64$  %. Zatímco slaměné pelety s nejnižším obsahem celkového Mg v sušině uvolnily do výluhu CAT  $28,79 \pm 0,59$  % hořčíku.

Přístupnost prvku se během předkompostování ve všech vzorcích snížila. VK podpořilo přístupnost hořčíku u vzorků 8, 9, 10 a 11. Varianta 12 byla PKO i VK ovlivněna negativně a v obou případech přístupnost prvku klesla.



Graf 17 - Přístupný Mg pro rostliny v % z celkového obsahu

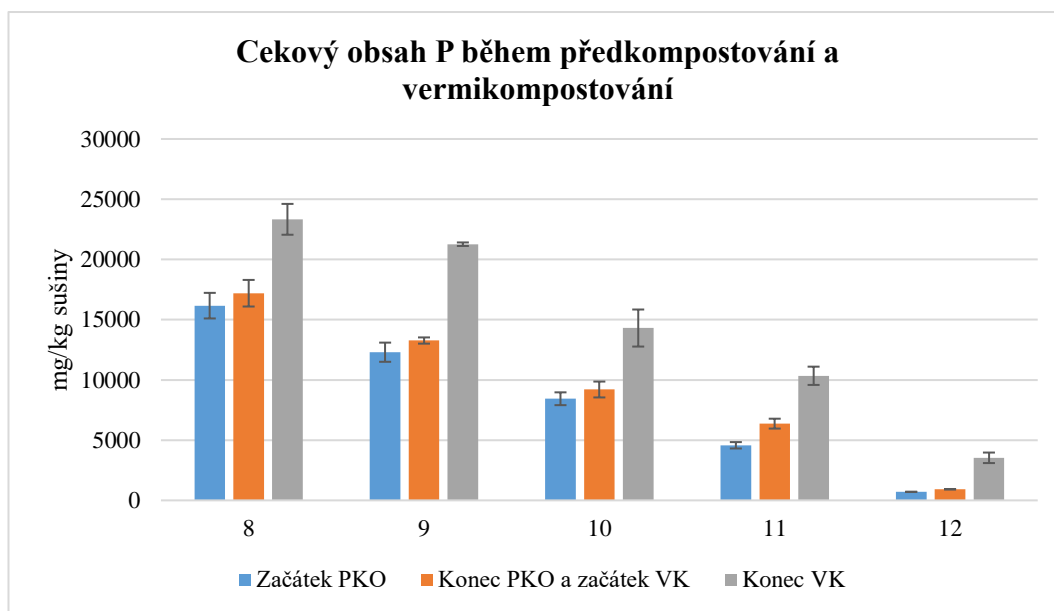
Stejně tak jako v ostatních případech i celkový obsah hořčíku v sušině byl analyzován u substrátu. Ten s počáteční hodnotou 2773,63 mg/kg byl při vermikompostování navyšován. Projevilo se zde složení variant a s přidavkem kalu z ČOV taky rostl obsah hořčíku na konci vermikompostování (viz Graf 18).



Graf 18 - Celkový obsah Mg v substrátu během vermikompostování v mg/kg sušiny

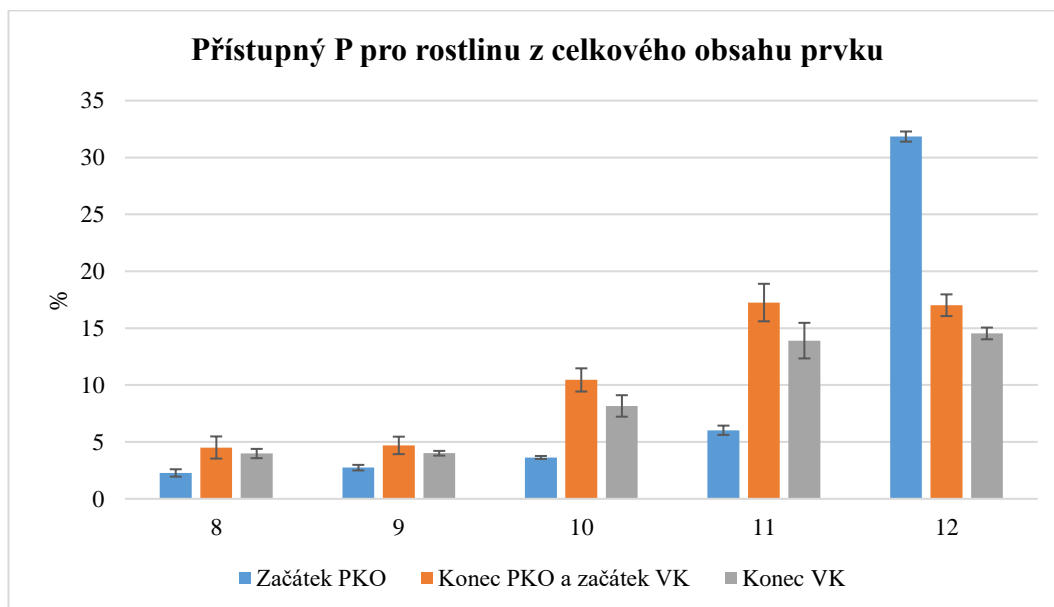
#### 5.2.5.4 Fosfor (P)

Minimální celkový obsah fosforu byl naměřen ve vzorcích 12 (viz Graf 19). Před nakládáním byl obsah stanoven na  $709,64 \pm 13,77$  mg/kg a při konci pokusu obsah vzrostl o 2825,12 mg/kg P. Obsah se ve všech variantách zvětšil významněji při VK.



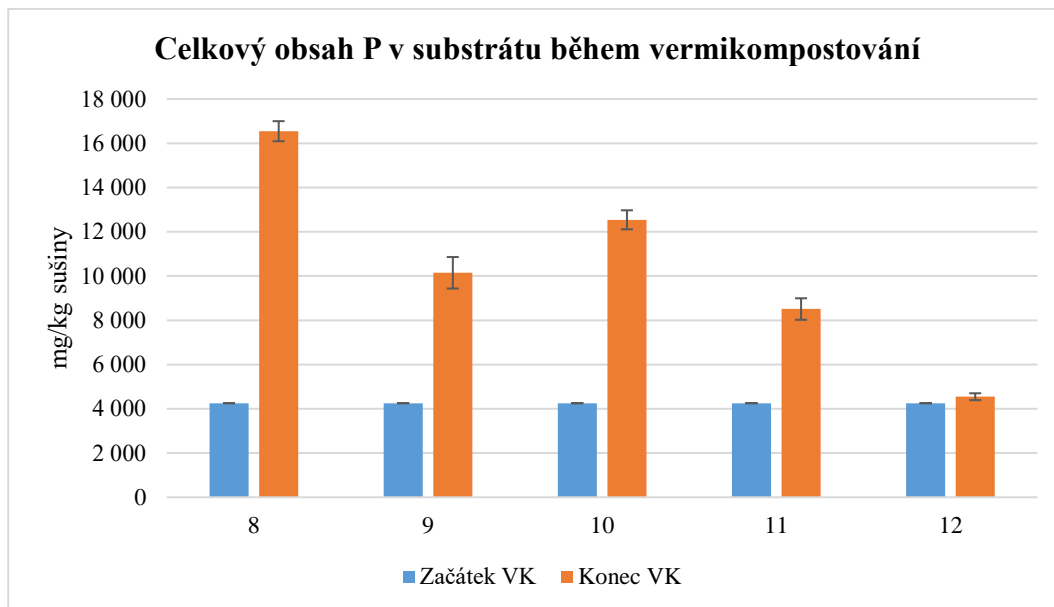
Graf 19 – Celkový obsah P během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny

U fosforu stejně jako u hořčičku se projevily rozdíly u zkoumání přístupného obsahu prvku pro rostlinu a organismy. Varianta 12 měla sice nejmenší celkový obsah fosforu v sušině, ale naopak nejvíce fosforu z této varianty bylo uvolněno do výluhu CAT. Varianta 8 bohatá na celkový obsah P má 3,36krát menší přístupnost fosforu než varianta 12.



Graf 20 - Přístupný P pro rostliny v % z celkového obsahu

Vývoj celkového obsahu fosforu v substrátu při vermikompostování je znázorněn na Grafu 21. Největší změna byla u varianty 8, ta měla stejně jako ostatní varianty počáteční hodnotu 4253,73 mg/kg P v sušině. Během vermikompostování u zmíněné varianty vzrostla hodnota na  $16547,86 \pm 453,42$  mg/kg. Nejmenší změny byly u 100 % slaměných pelet, a to pouze o 291,69 mg/kg.



Graf 21 - Celkový obsah P v substrátu během vermikompostování v mg/kg sušiny

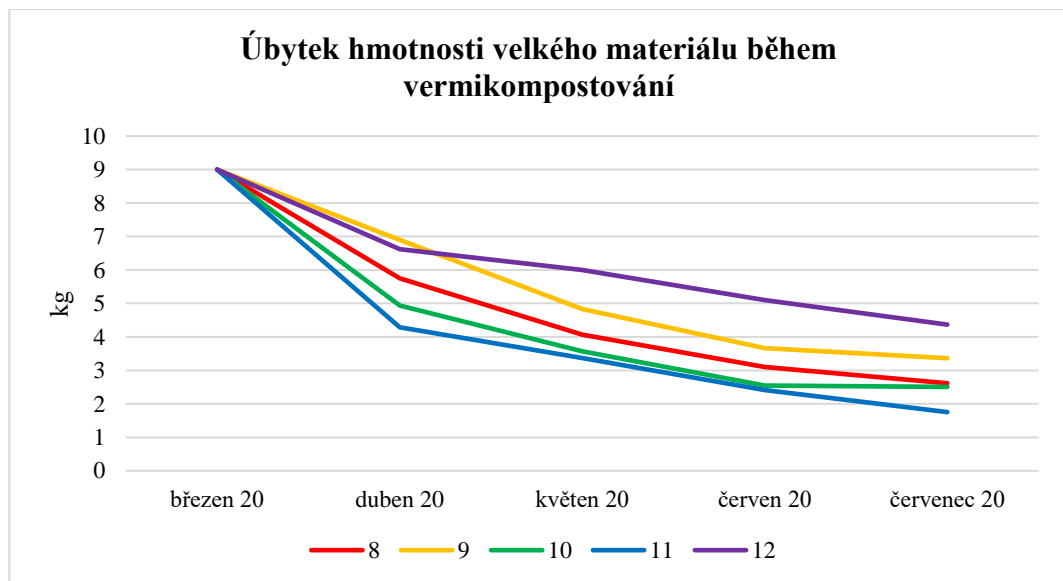


## 5.3 Vermikompostování

### 5.3.1 Vývoj hmotnosti vlhkého materiálu během vermikompostování

Během vermikompostování docházelo k rozkladu organické hmoty, a to se projevilo na snižování hmotnosti a objemu vermikompostovaného materiálu v čase.

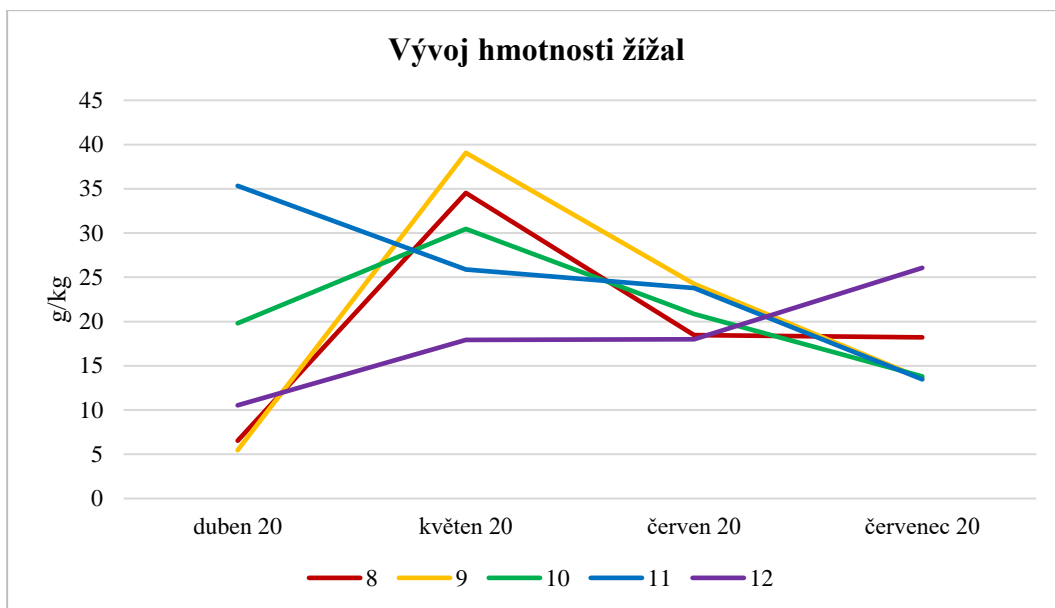
Nejvíce klesla hmotnost u varianty 11 z původních 9 kg na  $1,75 \pm 0,05$  kg vlhké hmotnosti. Naopak u varianty 12 (100 % slaměných pelet) došlo k nejmenšímu poklesu, a to také z původních 9 kg na  $4,37 \pm 0,38$  kg. U této varianty byl průběh rozkladu nejpomalejší (viz Graf 22).



Graf 22 - Úbytek hmotnosti vlhkého materiálu během vermikompostování v kg

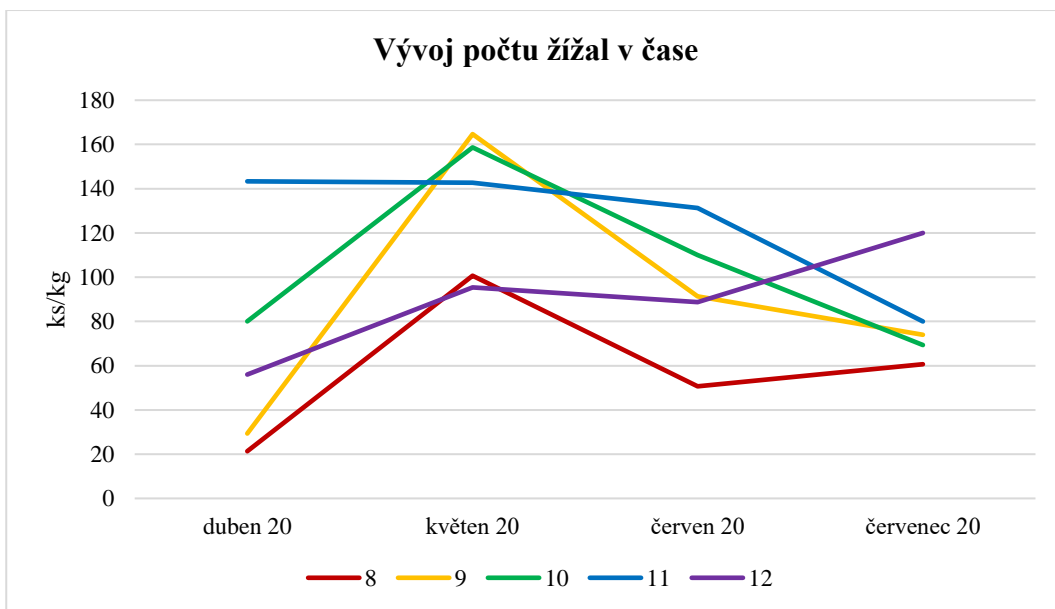
### 5.3.2 Vývoj biomasy žížal ve vermikompostu

Při porovnání skupin v měsíci dubnu můžeme vidět, že nejvyšší průměrný počet žížal byl ve skupině 11, ale postupem času objem žížal klesal. Varianty 8, 9 a 10 měly vrchol žížalí populace obsažené ve vermikompostovaném materiálu v měsíci květnu. Ve směsi 12 populace v průběhu celého pokusu rostla, nejednalo se o strmý nárůst, ale o průběžný přírůstek (viz Graf 23).



Graf 23- Vývoj hmotnosti biomasy žížal ve vermikompostu v g/kg

Dále z hlediska počtu kusů žížal zastoupených v jednotlivých materiálech (viz Graf 24). Průběh ve variantách 8, 9, 10 a 12 kopíruje průběh hmotnosti žížal a křivky Grafu 23 a 24 jsou velmi podobné. Rozdíl můžeme vidět u varianty 11, která u sledování hmotnosti projevovала od měsíce dubna při každém odběru pokles populace. Zatím co v Grafu o Vývoji počtu žížal není tento pokles viditelný. Z hlediska počtu žížal měla varianta 11 menší úbytek než na hmotnosti.



Graf 24 - Vývoj počtu žížal ve vermikompostu v ks/kg

### 5.3.2.1 Statistické šetření

Vzhledem k relativně malému počtu dat bylo statistické hodnocení provedeno jenom u variant 11 a 12, kvůli ověření hypotézy. Kde ostatní varianty jsou podrobněji popsány

v předchozí kapitole. Pro posouzení normality dat byl využit Shapir-Wilkův test normality pro průměrná data směsí 11 a 12.

Varianta 11 testována statistika  $W$  pro poměr hmotnosti žížal ve směsi;  $W_{(3)} = 0,98$ ;  $p = 0,90$ ; nemůžeme tedy zamítnout  $H_0$ : vzorky pocházejí z normálního rozdělení.

Varianta 12 z hlediska posouzení normality dat Shapir-Wilkův test normality měla výsledky  $W_{(3)} = 0,95$ ;  $p = 0,70$ ; nemůžeme tedy zamítnout nulovou hypotézu a vzorky pocházejí z normálního rozdělení.

Dále byla ve variantě 11 otestována korelace mezi hmotností žížal a časem (počtem měsíců) pomocí Pearsonova korelačního koeficientu. Ten byl využit kvůli tomu, že data pocházejí z normálního rozdělení.

$H_0$ : není žádná závislost mezi objemem žížal ve vermikompostovaném materiálu a časem.

$H_1$ : existuje závislost mezi objemem žížal ve vermikompostovaném materiálu a časem.

$R_{(3)} = -0,98$ ;  $p = 0,03$  to znamená, že při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  lze zamítnout  $H_0$ . To znamená, že existuje závislost mezi objemem žížal ve vermikompostu a časem. Počet žížal klesá s časem.

Závislost stejně jako u varianty 11 byla posuzována i u varianty 12. Kdy  $R_{(3)} = 0,91$ ;  $p = 0,09$ . To znamená, že při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  nelze zamítnout nulovou hypotézu. Nebylo tedy prokázáno, že existuje závislost mezi objemem žížal a časem.

Dále bylo provedeno hodnocení normality průměrných dat ze sledování počtu kusů v 1 kg vermikompostované hmoty. Přistoupilo se k Shapiro-Wilkovu testu normality u vzorků 11 a 12. Testovaná statistika  $W$  pro počet žížal ve směsi 11,  $W_{(3)} = 0,76$ ;  $p = 0,048$ ; lze tedy zamítnout nulovou hypotézu. To znamená, že vzorky nepocházejí z normálního rozdělení.

Bylo přistoupeno k využití Spearmanova korelačního koeficientu.

$H_0$ : není žádná závislost mezi počtem žížal ve vermikompostovaném materiálu a časem.

$H_1$ : existuje závislost mezi počtem žížal ve vermikompostovaném materiálu a časem.

$R_{(3)} = -1$ ;  $p = 0,083$  to znamená, že při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  nelze zamítnout nulovou hypotézu. Neexistuje závislost mezi počtem žížal a časem.  $R$  je záporné, a to by naznačovalo, že počet žížal bude klesat s časem. Tento jev může být v tomto případě způsoben pouze nedostatkem důkazů, tj. malý počet vzorků a rozsah dat. Dle záporné hodnoty testované statistiky je viditelné, že vztah mezi počtem žížal a časem je záporný, pokud existuje.

Dále byla obdobným způsobem hodnocena varianta 12, testem normality,  $W_{(3)} = 0,97$ ;  $p = 0,89$  nelze tedy zamítnout nulovou hypotézu a vzorky pocházejí z normálního rozdělení. Dále se přešlo k určení korelačního koeficientu. Se stejnými hypotézami jako u vzorku 11 z hlediska počtu kusů ve vermikompostovaném materiálu v čase. Výsledkem je, že  $R_{(3)} = 0,91$ ;  $p = 0,09$ , se zachováním stejné hladiny významnosti jako v předchozích příkladech nelze zamítnout nulovou hypotézu. Neexistuje závislost mezi počtem žížal ve vermikompostovaném materiálu a časem, což může být způsobeno pouze nedostatkem sesbíraných dat. Dle kladné hodnoty testované statistiky, je viditelné, že vztah mezi počtem žížal a časem je kladný, pokud existuje.

Na závěr je nutné podotknout, že vzhledem k omezenému množství dat síla testů může být nedostatečná (neexistuje dostatečné množství důkazů) pro odhalení statistiky významných rozdílů mezi variantami.

## 6 Diskuze

### 6.1 Teploty během předkompostování

Vývoj teplot jednotlivých variant byl posuzován z hlediska průběžného vývoje teplot a dosažených maximálních hodnot. Z Grafu 1 a 2 vyplývá, že varianty 1 a 7 (100 % kalu) a varianty 2 a 8 (25 % kalu a 75 % slaměných pelet), měly podobný teplotní vývoj, a na konci předkompostování se teplota přiblížila ke stejným hodnotám. Popsané varianty se držely v nižším teplotním intervalu, a to konkrétně od 5 do 35 °C. To prokázalo i statistické hodnocení (viz Kapitola 5.1.1.1).

Nižší předkompostovací teploty lze u těchto variant připisovat složení materiálu. Jedná se o varianty s vyšším obsahem kalu, to znamená s nižším obsahem celkového uhlíku a užším poměrem C:N, které je základním parametrem, který ovlivňuje kvalitu kompostovacího procesu (viz Kapitola 3.3.1.2). Při úzkém poměru C:N v čerstvém předkompostovaném materiálu převyšuje obsah dusíku a spíše by mohl vznikat čpavek a docházet k poklesu produktivity humusových látek.

Pro posouzení hypotézy, že nejvyšší teplota v termofilní fázi předkompostování bude u varianty se samotnými peletami je zde Graf 1 a 2 a Obrázek 9 a 10. Nejprve již z vývoje grafů, můžeme vidět, že u varianty 5 a 11 (100 % slaměných pelet), dochází ke křížení teplotních vrcholů s variantami 4 a 10 (25 % kalu a 75 % slaměných pelet). V prvním případě mezi variantou 4 a 5 měla větší teplotní průměr varianta 5. V opakování ve variantách 10 a 11 měla vyšší průměrnou teplotu varianta 10.

Přistoupilo se k statistickému hodnocení pomocí Kruskal-Wallis ANOVA testu, kde byla zamítnuta nulová hypotéza a lze rozlišit významné rozdíly mezi testovanými skupinami. (viz 5.1.1.1). K bližšímu určení, mezi jakými variantami se nachází rozdíl teplot byl proveden Tukey's HSD test, který odhalil, že mezi skupinou 4 a 5; 10 a 11 nejsou statisticky významné rozdíly. Hypotézu o nejvyšší teplotě při termofilní fázi ve slaměných peletách musíme na základě zjištění zamítnout. Podle Chen (2012) je pro termofilní fázi typická vysoká spotřeba kyslíku, teplota a vysoká rychlost degradace organických látek. U tohoto zkoumání přístup kyslíku na vývoj neměl vliv, jelikož do všech aerobních fermentorů byl vzduch vháněn stejně. Při pohledu na Graf 7 s vývojem celkového obsahu uhlíku v obou variantách došlo k minimálnímu snížení při předkompostování. Tím pádem dle Chen (2012), nebyla degradace ve variantách natolik rozdílná, aby významně změnila teploty variant a ty měly statisticky průkazné rozdíly. Přesto lze potvrdit, že s přidavkem pelet teplota ve variantách narůstala. Jelikož při porovnání všech variant společně, byly nalezeny statisticky významné rozdíly. To znamená, že varianta se 100 % pelet nebyla teplotně dominantní, ale se zvyšujícím se obsahem pelet docházelo ke zvýšení teplot.

Žádná z variant neprošla hygienizací podle normy o Kompostování, ve variantách 1, 2, 3, 7, 8 a 9 nebylo dosaženo potřebné teploty. U variant 4, 5, 10 a 11 byla dostatečně vysoká teplota, ale chyběla souvislá minimální doba udržení teploty (viz Tabulka 2).

## 6.2 Změna agrochemických parametrů během předkompostování a vermikompostování

Při smíchání materiálu na základě Chen (2012) je nutno při kompostování kalu z ČOV přihlížet na vysoký obsah vody, malou pórovitost a vysokou viskozitu. Je dobré surovinu před kompostováním upravit, obvykle je možné ji naředit listy, pilinami, slámou nebo dřevem (Chen 2012). V tomto případě bylo tak učiněno a varianty byly naředěny v různých poměrech kal, slaměné pelety. Pramenik et al. (2007) dává důraz na význam obsahu snadno rozložitelné hmoty pro rychlejší rozklad a jako živina pro organismy. V našem případě, bylo zkoumání o to složitější, jelikož se jednalo o kal z čistíren odpadních vod, který není tolik bohatý na snadno rozložitelné organické látky jako například biologicky rozložitelný odpad ze zeleně nebo kuchyňský odpad.

Hodnota pH je dalším klíčovým parametrem pro funkci předkompostování a vermikompostování. Během předkompostování došlo ke zvýšení pH v případě variant 8, 9, a 10. K poklesu potom ve variantě 11 a 12 (viz Graf 3). Při VK došlo k poklesu pH u čtyř variant z pěti a lze tyto varianty hodnotit na škále pH jako kyselé. To znamená, že varianty obsahující kal nesplňují minimální požadované pH pro použití na zemědělskou půdu dle ČSN 46 56735 což je minimální pH 6. Tento pokles pH přisuzujeme právě kalu. Jednalo se o surový kal, který před VK prošel 14denním předkompostováním, které mělo tendenci pH zvýšit v důsledku rychlého rozkladu organických látek. Obdobné navýšení pH v průběhu předkompostování bylo i ve studii Hanc & Chadimova (2014).

Dále při vermikompostování ve směsích, které obsahovaly kal mohly vznikat kyselé látky. Což také potvrzuje Hanc & Chadimova (2014). Dále i Sathur (2010), který vermikompostoval zemědělsko-průmyslový kal. Konkrétněji pokles pH mohly způsobit minerální organické sloučeniny, díky nim se zvýšil obsah organických a huminových kyselin.

Tvorba kyselin se nemusela projevit během PKO v důsledku kontrolovaného přívodu vzduchu pro vytvoření vhodných předkompostovacích podmínek. Při VK se o provzdušňování materiálu staraly pouze žížaly. Materiál také prošel určitým rozkladem při PKO a tím pádem nevykazoval stejnou strukturu jako na počátku. Vzorky byly hutnější a méně drobné, tím pádem zamezovaly přirozenému průchodu vzduchu. Důležitost struktury potvrzuje Chen (2012).

Cílem úpravy organického materiálu byl nárůst elektrické vodivosti. To se ve všech případech podařilo (viz Graf 5). U varianty 8 byla větší změna během předkompostování než u vermikompostování. V ostatních případech došlo k větším změnám při VK. EC se zvýšila ve všech variantách se žížalami, což lze vysvětlit uvolněním vázaných prvků během trávení žížal (Garg et al. 2006), dále během PKO i VK se EC zvyšovalo vlivem uvolňování minerálních látek během rozkladu organické hmoty ve formě kationtů (Tognetti et al. 2005). Konkrétněji proces rozkladu popisuje Cai et al. (2018), kde došlo k většímu zvýšení EC stanovovaném ve vodném výluhu u kompostování než u vermikompostování z původní hodnoty 1,25 dS/m na 2,13 dS/m V Lazcano et al. (2008) EC pokleslo proti původní hodnotě u kombinace procesů na 0,72 dS/m i u vermikompostování na 0,78 dS/m, kladný vývoj byl zaznamenán jen u kompostování

z důvodu uvolnění rozpustných solí, po degradaci nejlabilnějších sloučenin v termofilní fázi kompostování.

Z hlediska našeho zkoumání může být pokles EC ve variantách 11 a 12 během PKO z důvodu složení materiálu. Jelikož varianty, které obsahovaly i slaměné pelety, které jsou pro rozklad složitější tak potřebovaly více času na rozklad. Mikroorganismy spotřebovaly potřebné organické látky a opětovný nárůst způsobila až přítomnost žížal.

Na obsahy jednotlivých makroživin je nutné pohlížet jako na celek. Nízký obsah jakéhokoliv prvku může negativně ovlivnit celý vývoj předkompostování i vermikompostování. Prvky na sebe navzájem působí. O tom mluví G. Guzman et al. (2020), konkrétně o kalu z čistíren odpadních vod, který obsahuje sloučeniny bohaté na zdroje organických látek, ale i dusík, fosfor a další živiny.

Při předkompostování došlo k prudkému poklesu C/N ve variantách 9, 10 a 11. Tento výsledek byl pravděpodobně způsoben mikrobiálním dýcháním, rozkladem organických sloučenin, které snížily hmotnost a objem předkompostované hmoty. Obdobný jev se projevil ve studii Hanc & Chadimova (2014) po měsíci vermikompostování výlisků z jablečného odpadu. Dalším extrémem je průběh rozkladu 100 % pelet při minimální změně zkoumaného parametru během PKO a významného snížení při VK. Za to pravděpodobně může rozdílná doba PKO, VK, teplota během předkompostování a aktivita žížal během VK (viz Graf 9). Zhao et al. (2015) zkoumal zastoupení štěpky v kalu, při snižujícím se množství dřevěné štěpky bylo navázáno více amoniaku.

Celkový obsah uhlíku v sušině se při PKO výrazně nezměnil, to můžeme připisovat krátké době PKO. Běžně kompostování trvá několik týdnů dle Plíva (2006) a během této doby se rozkladem na CO<sub>2</sub> uhlík sniží. Znatelněji na materiály působilo VK což potvrzuje Graf 7. Zásadní vliv na to měla nejenom funkce žížal, ale i doba vermikompostování.

Na vápník, hořčík a fosfor byly bohatší ty varianty, které obsahovaly kal. Se zvyšujícím se obsahem slaměných pelet se objem prvku ve variantách snižoval. Celkový obsah hořčíku a draslíku vzrostl během PKO a VK což můžeme spojovat se ztrátou hmotnosti a organických látek (Wani & Rao 2013). Celkový obsah vápníku se u všech variant v průběhu PKO a VK navýšil. Intenzivněji během VK. To můžeme přisuzovat aktivitě žížal a rozdílným dobám procesů, kdy VK trvalo delší dobu než PKO a materiál měl tak delší časový horizont ke změnám. Vliv těchto parametrů je zaznamenán u Lazcano et al. (2008) a Cai et al. (2018). Také aktivita žížal a průchod materiálu trávicím systémem ovlivňuje kvalitu hmoty. Jelikož živiny přítomné v organickém odpadu jsou pak lépe transformovány na chemické formy, které jsou rostlinám dostupnější (Garg et al. 2012).

Celkový obsah hořčíku měl ve všech variantách stejný průběh jako obsah vápníku. S tím, rozdílem, že u hořčíku jsme hodnotili i dostupnost prvku do vodného výluhu. PKO i VK se pozitivně projevilo na nárůstu celkového obsahu, ale při sledování dostupnosti prvku můžeme v Grafu 17 vidět pokles dostupnosti z celkového obsahu prvku u varianty 12. U této varianty vlivem působení mikroorganismů a žížal došlo k poklesu dostupnosti i přes navýšení celkového obsahu. To můžeme odůvodnit tím, že pro správnou funkci mikroorganismů a žížal byl odebírán dostupný hořčík. Tím pádem se celkový obsah mohl zvýšit, z důvodu rozkladu hmoty a poklesu hmotnosti, ale zároveň se snížila dostupnost prvku (viz Graf 22). Ve zbylých variantách se dostupnost prvku během rozkladu zvyšovala.

Celkový obsah fosforu znázorněn v Grafu 19 měl obdobný vývoj ve zkoumaných skupinách jako vápník a hořčík. S významným rozdílem u dostupnosti prvku. Zde mělo PKO pozitivní vliv na dostupnost fosforu ve skupinách 8 až 11, při vermikompostování obsah dostupného fosforu klesl. Varianta 12 měla jenom negativní průběh, a to pokles dostupnosti jak při PKO tak i VK. Lazcano et al. (2008) dosáhl zvýšení dostupnosti fosforu pouze během kompostování, a to ze vstupní hodnoty 211 mg/kg v sušině na 342 mg/kg v sušině. U Cai et al. (2018) byl na počátku přístupný fosfor 500 mg/kg a během kompostování vzrostla hodnota o 300 mg/kg a u vermikompostování narostla původní hodnota o 600 mg/kg.

U fosforu je zajímavé podle Grafu 21 sledovat proměnu substrátu. Ve variantě 8 došlo k čtyřnásobnému navýšení celkového obsahu fosforu proti počátečnímu obsahu v substrátu. Může se jednat o projev přenosu vermikompostovaného materiálu, žížaly svým pohybem kal vnášely do substrátu nebo také mohlo být způsobeno výkaly žížal. Pomocí trávicího enzymu fosfatázy, se přirozeně zvyšuje obsah dostupných forem fosforu. Díky těmto trávicím pochodům se přemění větší množství zpracované organické hmoty na lépe dostupné formy živin (Suthar 2010). To v našem případě nemůžeme na základě výsledků přístupného P ve vermikompostu potvrdit.

Celkový obsah draslíku se od ostatních živin lišil tím, že výsledky měření prokazatelně ukázaly nejnižší obsah draslíku právě v samotném kalu a s přibývajícím obsahem pelet se zvyšoval. Samotný průběh PKO a VK už měl za následek nárůst celkového obsahu prvku ve všech variantách a průběh byl tím pádem stejný jako u vápníku a ostatních makroživin, a stejně jako u nich tento nárůst můžeme připisovat rozkladu organického hmoty a nížení její hmotnosti (viz Graf 22).

Opět se na pokusu projevil pokles přístupnosti draslíku v % z celkového obsahu prvku ve variantě 12 i 11 (viz Graf 14), zapříčiněnou funkcí žížal a mikroorganismů a složením materiálu primárně ze slaměných pelet. PKO snížilo dostupnost draslíku ve variantě 8, 9 a 10. VK následně pokles vykompenzovalo a dostupnost zvýšilo i oproti ostatním hodnotám.

Podle Lazcano et al. (2008) žížaly podporují retenci dusíku a postupné uvolňování fosforu, stejně jako zvýšení elektrické vodivosti, čímž se vytvoří vylepšený materiál pro zemědělství (viz Tabulka 11). V našem zkoumání lze toto potvrdit. Stejně jako u Hanc & Chadimova (2014) byl zaznamenán nárůst makroživin. Což můžeme přisuzovat straně hmotnosti a organických látek, podle složení jednotlivých variant se přístupnost jevila lépe u kalu nebo kombinace.

### **6.3 Nárůst biomasy žížal v čase**

Graf 22 a 24 ukazuje vývoj celkové hmotnosti a počtu žížal v 1 kilogramu vermikompostovaného materiálu. Varianty 8, 9 a 10 měly největší hmotnost i počet žížal v květnu, to je po dvou měsících vermikompostování. Pak začala výnosnost klesat. To může být způsobenou změnou pH, které postupně klesalo. Optimální a nestresující prostředí je pro žížaly podle Zajonc (1992) v hodnotách 6,5 – 8,5, ale například Edwards et al. (2011) uvádí, že kalifornská žížala zvládá výkyvy pH v rozmezí od 4,5 do 9.

Stanovená hypotéza říká, že přídavek slaměných pelet bude mít pozitivní vliv na nárůst hmotnosti a počtu biomasy žížal během následného vermikompostování. Pokud bychom hodnotili variantu 12 (100 % slaměných pelet) na základě Spearmanova korelačního

koeficientu nelze prokázat, že existuje závislost mezi hmotností a počtem žížal a časem, přesto graf ukazuje pravidelný nárůst mezi měsíci. Kladné R naznačuje, že s přibývajícím časem by mělo docházet i k nárůstu počtu a hmotnosti žížal v čase. V tomto případě může být negativní výsledek (zamítnutí  $H_0$ ) způsoben pouze nedostatkem dat.

U varianty 11 je potvrzený pokles hmotnosti žížal v čase pomocí stejného statistického šetření jako u varianty 12. Ve variantě 11 byla největší hmotnost žížal odebrána po měsíci vermikompostování. Dominguez et al. (2000) ukazuje na to, že kvalita potravy pro žížaly ovlivňuje velikost populace, jejich růst a rychlost reprodukce. Žížaly mohou ovlivnit svůj vývoj a reprodukci na základě množství a přístupnosti živin. Reprodukci dokážou pozastavit ve prospěch vývoje a opačně. V tomto případě, se tento jev mohl projevit ve variantě 11 i z hlediska, že počet žížal a vliv času na jejich množství nebylo statistiky potvrzeno. R vyšlo záporné ( $H_0$  nebyla zamítnuta) to znamená, že vzorek má tendenci klesat v čase, v případě, že existuje závislost. Vzhledem k malému množství výsledků je ve všech testovaných případech nedostatečná síla testu.

Při krátkodobějším pokusu by se jevil kal jako lepší živina pro žížaly na základě obsahu dostupných živin. Ve variantě se samotnými peletami se i přes statistické nepotvrzení trend jevil jako narůstající, což potvrzuje i kladné R. Pro potvrzení hypotézy je potřeba následné zkoumání a vyšší četnost odběrů, pro získání dalších relevantních dat ke statistickému hodnocení.



## 7 Závěr

Voda je základem života a její využívání v domácnostech i v průmyslu je ukázkou moderní civilizace. Pohodlí, které pociťujeme při otočení kohoutku a spuštění vody je vykompenzováno znečištěním, které je nutné dále řešit. Jedná se o znečištění vody samotné a vznik druhotných odpadů jako například kalu z čistíren odpadních vod.

Je důležité zdokonalovat technologie a hledat způsoby využití kalu z ČOV. Tento produkt má potenciál stát se kvalitním zdrojem živin pro zemědělskou půdu. Podle G. Guzman et al. (2020) slouží kaly z ČOV v zemědělství jako půdní kondicionéry a za správných podmínek má aplikace kalu pozitivní přínos na kvalitu půdy. Jsou zde, ale rizika s tím spojená.

Hypotéza jedna o nejvyšší teplotě ve variantě se 100 % slaměných pelet nebyla statisticky potvrzena při porovnání teplot variant 100 % pelet vs 75 % kalu a 85 % slaměných pelet se nevyskytují signifikantní rozdíly mezi průměry. Statistické hodnocení mezi ostatními variantami vůči variantě se 100 % ukazuje významné rozdíly v průměrných teplotách. To potvrzuje nárůst teploty s narůstajícím množstvím pelet i přes to, že varianta 100 % pelet nebyla nejteplejší.

Druhá hypotéza o větších změnách v parametrech během předkompostování než během vermikompostování má v jednotlivých sledovaných parametrech odlišné průběhy. Předkompostování se spíše jeví jako méně efektivní oproti vermikompostování. Na proces je, ale potřeba pohlížet jako na celek. Proto lze doporučit další výzkum porovnání kombinovaného procesu se samostatným vermikompostováním a plnohodnotným kompostováním. Na vývoj získaných parametrů měla značný vliv časová dotace kompostování, která byla 14 dní proti 4 měsícům vermikompostování.

Hypotéza o pozitivním vlivu při nárůstu zastoupení slaměných pelet v jednotlivých variantách je statisticky nepotvrzena. Hodnoty ve variantě 12 tento průběh naznačují, nelze ho, ale statisticky potvrdit kvůli množství nasbíraných dat. Dále je potřeba přihlédnout k migraci žížal ve vermikompostovací misce. Žížaly mohly přirozeně vyhledávat prostředí substrátu a do vermikompostované hmoty se přesouvat pouze pro potravu.

Na závěr je nutné zohlednit, že výzkum probíhal v laboratorním prostředí, pro aplikování postupu ve větším měřítku by bylo vhodné provedení výzkumu ve větším množství bez pozitivního přínosu vymezených podmínek v laboratoři jako byla udržovaná teplota, provzdušnění i vlhkost. S přihlédnutím na celkové výsledky se jeví varianty s kalem jako vhodnější pro následnou aplikaci na zemědělskou půdu kvůli přístupným množstvím makroživin, přesto pro aplikaci na půdu pH zvyhodňuje spíš variantu se slaměnými peletami.

## 8 Seznam literatury

- Aira M, Monroy F, Domínguez J. 2006. C to N ratio strongly affects population structure of *Eisenia fetida* in vermicomposting systems. *European Journal of Soil Biology* **42**:S127.
- Borah M, Mahanta P, Kakoty S, Saha U, Sahasrabudhe A. 2007. Study of quality parameters in vermicomposting. *Indian Journal of Biotechnology* **6**:410-413.
- Cai L, Gong X, Sun X, Li S, Yu X. 2018. Comparison of chemical and microbiological changes during the aerobic composting and vermicomposting of green waste. *PLoS ONE* **13**:1-16.
- ČSN 46 5735. 2020. Kompostování. Úřad pro technickou normalizaci, Praha.
- Domínguez J, Edwards C, 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**:24-32.
- Eastman B, Stermer A, Mobley J, Kane P, Edwards C, Gunadi B, Trytek L. 2001. The effectiveness of vermiculture in human pathogen reduction for USEPA biosolids stabilization. *Compost Science* **9**:38-49.
- Edwards C, Arancon N, Sherman R. 2011. Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management. CRP Press, Florida.
- FAO, ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main report. Food and agriculture organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Farrell M, Jones D. 2009. Heavy metal contamination of a mixed waste compost: Metal speciation and fate. *Bioresource Technology* **100**:4423-4432.
- G. Guzman M, Udtojan M, Del Castillo M, Espiritu E, Estiva J, Unson J, Dumo J, Espinas J. 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**:205-214.
- Garg P, Gupta A, Satya S. 2006. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Bioresource Technology* **97**:391-395.
- Garg V, Suthar S, Yadav A. 2012. Management of food industry waste employing vermicomposting technology. *Bioresource Technology* **126**:437-443.
- Golbaz S, Zamanzadeh M, Pasalari H, Farzadkia M. 2021. Assessment of co-composting of sewage sludge, woodchips, and sawdust: feedstock quality and design and compilation of computational model. *Environmental Science and Pollution Research* **28**:12414-12427.
- Groda B. 1995. Technika zpracování odpadů. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.

- Hanc A, Hrebeckova T, Pliva P, Cajthaml T. 2020. Vermicomposting of sludge from a malt house. *Waste Management* **118**:232-240.
- Hanc A, Chadimova Z. 2014. Nutrient recovery from apple pomace waste by vermicomposting technology. *Bioresource Technology* **168**:240-244.
- Hanc A, Szakova J, Ohecova P. 2014. Differences in the mobility of Cd, Cu, Pb and Zn during composting of two types of household bio-waste collected in four seasons. *Bioresource Technology* **168**:204-213.
- Harada H, Strande L, Fujii S. 2016. Challenges and opportunities of faecal sludge management for global sanitation. Towards future earth: Challenges and progress of global environmental studies. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Available at [https://www.researchgate.net/profile/Hidenori-Harada/publication/333041477\\_Challenges\\_and\\_Opportunities\\_of\\_Faecal\\_Sludge\\_Management\\_for\\_Global\\_Sanitation/links/5cd8d9a2a6fdccc9dda6a9c0/Challenges-and-Opportunities-of-Faecal-Sludge-Management-for-Global-Sanitation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hidenori-Harada/publication/333041477_Challenges_and_Opportunities_of_Faecal_Sludge_Management_for_Global_Sanitation/links/5cd8d9a2a6fdccc9dda6a9c0/Challenges-and-Opportunities-of-Faecal-Sludge-Management-for-Global-Sanitation.pdf) (accessed April 25, 2021).
- Hatayama K, Shoun H, Ueda Y, Nakamura A. 2005. *Planifilum fimeticola* gen. nov., sp. nov. and *Planifilum fulgidum* sp. nov., novel members of the family 'Thermoactinomycetaceae' isolated from compost. *International journal of systematic and evolutionary microbiology* **55**:2101-2104.
- Hejátková K. 2002. Faremní kompost: vyrobený kontrolovaným mikrobiálním procesem: realizační pomůcka pro zpracování podnikové normy. Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha.
- Chen Y. 2012. Sewage sludge aerobic composting technology research progress. *AASRI Procedia* **1**:339-343.
- Ilie V, Mihalache M. 2019. Vermicompost production and its importance for soil and agricultural production. *Agronomy Series of Scientific Research / Lucrari Stiintifice Seria Agronomie* **61**:56-62.
- Kalina M. 1999. Kompostování a péče o půdu. Grada, Praha.
- Kalina M. 2004. Kompostování a péče o půdu 2. upr. vyd.. Grada, Praha.
- Karmegam N, Jayakumar M, Govarathanan M, Kumar P, Ravindran B, Biruntha M. 2021. Precomposting and green manure amendment for effective vermitransformation of hazardous coir industrial waste into enriched vermicompost. *Bioresource technology* **319**:124136.
- Koyama M, Nagao N, Syukri F, Rahim A, Kamarudin M, Toda T, Mitsunashi T, Nakasaki K. 2018. Effect of temperature on thermophilic composting of aquaculture sludge: NH<sub>3</sub> recovery, nitrogen mass balance, and microbial community dynamics. *Bioresource Technology* **265**:207-213.

- Lazcano C, Gómez-brandón M, Domínguez J. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* **72**:1013-9.
- Liu L, Ye Q, Wu Q, Liu T, Peng S. 2021. Effect of biochar addition on sludge aerobic composting and greenbelt utilization. *Environmental Technology* **21**. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101279.
- Lung A, Lin C, Kim J, Marshall M, Nordstedt R, Thompson N, Wei C. 2001. Destruction of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella enteritidis* in cow manure composting. *Journal of food protection* **64**:1309-14.
- Magid J, Pedersen K, Hansen M, Cedergreen N, Brandt K. 2020. Comparative assessment of the risks associated with use of manure and sewage sludge in Danish agriculture. *Advances in Agronomy* **164**:289-334.
- Martinez D et al. 2009. Genome, transcriptome, and secretome analysis of wood decay fungus *Postia placenta* supports unique mechanisms of lignocellulose conversion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106**:1954-1959.
- Ministerstvo životního prostředí. Kaly z čistíren odpadních vod. Available from [https://www.mzp.cz/cz/kaly\\_cistiren\\_odpadnich\\_vod](https://www.mzp.cz/cz/kaly_cistiren_odpadnich_vod) (accessed 2020-12-29).
- OSN: Fakta o vodě. Available at <https://www.osn.cz/sdg-6-zajistit-vsem-dostupnost-vody-a-sanitacnich-zarizeni-a-udrzitelne-hospodareni-s-nimi/fakta-o-vode/> (accessed 2020-12-29).
- Plíva P. 2006. Zakládání, průběh a řízení kompostovacího procesu. Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha.
- Pramanik P, Ghosh G, Ghosal P, Banik P. 2007. Changes in organic – C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology* **98**:2485-2494.
- Rékási M et al. 2019. Comparing the agrochemical properties of compost and vermicomposts produced from municipal sewage sludge digestate. *Bioresource Technology* **291**. DOI: doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121861.
- Sava C, Pică E, Roman M. 2019. Considerations regarding the use of sludge in agriculture. *Research Journal of Agricultural Science* **51**:57-63.
- Sinha R, Herat S, Agarwal S, Asadi R, Carretero E. 2002. Vermiculture and waste management: study of action of earthworms *Elsinia foetida*, *Eudrilus euginae* and *Perionyx excavatus* on biodegradation of some community wastes in India and Australia. *Environmentalist* **22**:261-268.
- Soobhany N, Mohee R, Garg V. 2015. Recovery of nutrient from municipal solid waste by composting and vermicomposting using earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **3**:2931-2942. DOI: 10.1016/j.jece.2015.10.025.
- Suthar S. 2010. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology. *Ecological Engineering* **36**:1028-1036.

- Šarapatka B, Urban J. 2006. Ekologické zemědělství v praxi. PRO-BIO, Šumperk.
- Tesařová M. 2010. Biologické zpracování odpadů. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Ting A, Hermanto A, Peh K. 2014. Indigenous actinomycetes from empty fruit bunch compost of oil palm: Evaluation on enzymatic and antagonistic properties. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **3**:310-315.
- Tognetti C, Laos F, Mazzarino M, Hernandez M. 2005. Composting vs. vermicomposting: A comparison of end product quality. *Compost Science* **13**:6-13.
- Trávník K. 2020. Metodický návod pro hnojení plodin. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, odbor bezpečnosti krmiv a půdy, Brno.
- Wani K, Rao R. 2013. Bioconversion of garden waste, kitchen waste and cow dung into value-added products using earthworm *Eisenia fetida*. *Saudi Journal of Biological Sciences* **20**:149-154.
- Wanner F. 2019. Nakládání s čistírenskými kaly v České republice. Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, Praha.
- Water sanitation hygiene: Key facts from JMP 2015 report: WHO. Available at [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/en/) (accessed 2021-01-20).
- Wroble L. 2020. Sludge treatment and disposal. Salem Press Encyclopedia.
- Yilmaz Cincin R, Agdag O. 2019. Co-vermicomposting of wastewater treatment plant sludge and yard waste: Investigation of operation parameters. *Waste and Biomass Valorization* **11**: 6211-6222.
- Zajonc I. 1992. Chov žížal a výroba vermikompostu. Animapress, Povoda.
- Zákon č. 541/2020 Sb. 2020. Zákon č. 541/2020 Sb. Ministerstvo životního prostředí, Praha.
- Zemánek P. 2001. Speciální mechanizace: mechanizační prostředky pro kompostování. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.
- Zhao Y, Lu W, Damgaard A, Zhang Y, Wang H. 2015. Assessment of co-composting of sludge and woodchips in the perspective of environmental impacts (EASETECH). *Waste Management* **42**:55-60.

## 9 Seznam grafů, obrázků a tabulek

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 - Průběh teploty při předkompostování ve variantách 1 až 5 ve °C .....  | 42 |
| Graf 2 - Průběh teploty při předkompostování ve variantách 7 až 11 ve °C .....                                       | 42 |
| Graf 3 - pH během předkompostování a vermikompostování .....   | 46 |
| Graf 4 - pH substrátu během vermikompostování.....   | 46 |
| Graf 5 - Elektrická vodivost během předkompostování a vermikompostování v $\mu\text{s/cm}$ .....                     | 47 |
| Graf 6 - Elektrická vodivost substrátu během vermikompostování v $\mu\text{s/cm}$ .....                              | 47 |
| Graf 7 - Uhlík v průběhu předkompostování a vermikompostování v %.....   | 48 |
| Graf 8 - Uhlík v substrátu během vermikompostování v % .....   | 48 |
| Graf 9 - C:N v průběhu předkompostování a vermikompostování .....  | 49 |
| Graf 10 - C:N substrátu během vermikompostování .....  | 50 |
| Graf 11 – Celkový obsah Ca během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny .....                           | 50 |
| Graf 12 – Celkový obsah Ca v substrátu během vermikompostování.....  | 51 |
| Graf 13 -Celkový obsah K během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny                                   | 51 |
| Graf 14 – Přístupný obsah K v % z celkového obsahu.....  | 52 |
| Graf 15 - Celkový obsah K v substrátu během vermikompostování mg/kg sušiny .....                                     | 52 |
| Graf 16 – Celkový obsah Mg během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny .....                           | 53 |
| Graf 17 - Přístupný Mg pro rostliny v % z celkového obsahu .....   | 54 |
| Graf 18 - Celkový obsah Mg v substrátu během vermikompostování v mg/kg sušiny.....                                   | 54 |
| Graf 19 – Celkový obsah P během předkompostování a vermikompostování v mg/kg sušiny                                  | 55 |
| Graf 20 - Přístupný P pro rostliny v % z celkového obsahu.....   | 55 |
| Graf 21 - Celkový obsah P v substrátu během vermikompostování v mg/kg sušiny .....                                   | 56 |
| Graf 22 - Úbytek hmotnosti vlhkého materiálu během vermikompostování v kg .....                                      | 57 |
| Graf 23- Vývoj hmotnosti biomasy žížal ve vermikompostu v g/kg.....  | 58 |
| Graf 24 - Vývoj počtu žížal ve vermikompostu v ks/kg.....  | 58 |
| <br>   |    |
| Obrázek 1 - Aerobní fermentor.....   | 30 |
| Obrázek 2 - Vermikompostovací boxy .....   | 31 |
| Obrázek 3 - Plnění vermikompostovací misky, na obrázku nahoře vermikompostovaná surovina a dole žížalí substrát..... | 33 |
| Obrázek 4 - Odběrová místa na 500 g vermikompostované hmoty .....  | 35 |
| Obrázek 5 - Odběr vermikompostu v praxi .....  | 36 |
| Obrázek 6 - Umyté žížaly v kalíšku .....   | 36 |
| Obrázek 7 - Sušení vzorků při teplotě 30 °C po době měsíce .....   | 37 |
| Obrázek 8 - První fáze suchého rozkladu – vzorky na plotýnce .....   | 38 |
| Obrázek 9 - Boxplot graf teplot variant 1 až 5 při předkompostování na ose y °C.....                                 | 44 |
| Obrázek 10 - Boxplot teplot variant 7 až 11 při předkompostování na ose y °C .....                                   | 45 |
| <br>   |    |
| Tabulka 1 - Produkce a nakládání s čistírenskými kaly v ČR v tunách sušiny (Wanner 2019) .....                       | 12 |
| Tabulka 2 - Teplotní režimy během kompostovacího procesu (ČSN 46 5735 2020) .....                                    | 17 |
| Tabulka 3 - Určení stability kompostu pomocí teploty (Plíva 2006) .....  | 19 |
| Tabulka 4 - Limitní hodnoty indikátorových organismů ve vlhkém kompostu (ČSN 46 5735 2020) .....                     | 19 |
| Tabulka 5 - Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech nad 13 % sušiny v mg/kg sušiny (ČSN 46 5735 2020)..... | 19 |
| Tabulka 6 - Ukazatele jakosti kompostu (ČSN 46 5735 2020).....   | 20 |

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 7 - Výzkum kompostování kalů s přídatným materiálem.....   | 20 |
| Tabulka 8 - Porovnání procesů – souhrn z vypracovaného přehledu literatury (Zajonc 1992; Kalina 1999; Kalina 2004).....          | 25 |
| Tabulka 9 - Obsah živin v % sušiny (Kalina 2004).....  | 25 |
| Tabulka 10 - Přehled parametrů při zpracování zeleného odpadu (Cai et al. 2018).....   | 26 |
| Tabulka 11 - Přehled parametrů při zpracování hnoje skotu (Lazcano et al. 2008).....   | 26 |
| Tabulka 12 -Přehled parametrů vstupních materiálů při zpracování kalu z ČOV se zeleným odpadem (Yilmaz Cincin & Agdag 2019)..... | 27 |
| Tabulka 13 – Přehled parametrů po 60 dnech kompostování případně vermikompostování (Yilmaz Cincin & Agdag 2019).....             | 27 |
| Tabulka 14 – Přehled parametrů při zpracování kalu a odpadu ze zeleniny (G. Guzman et al. 2020).....                             | 28 |
| Tabulka 15 - Poměry namíchaných surovin v % (Karmegam et al. 2021).....  | 29 |
| Tabulka 16 – Přehled parametrů u předkompostování a vermikompostování kokosového odpadu (Karmegam et al. 2021).....              | 29 |
| Tabulka 17 - Poměr namíchaných vlhkých surovin použitých pro aerobní fermentory .....  | 31 |
| Tabulka 18 - Způsob plnění vermikompostovacích misek podle variant a substrátu.....  | 32 |
| Tabulka 19 - Odběr vzorků materiálu z procesu předkompostování.....  | 34 |
| Tabulka 20 - Označení jednotlivých variant.....  | 41 |
| Tabulka 21 - Statistické šetření normality dat Shapiro-Wilkovým testem normality .....   | 43 |

## 10 Samostatné přílohy

Příloha 1 - Celkový obsah C v % v 1 kg sušiny

| Varianta | Před  | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|-------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 32,85 | 30,87  | 30,11 | 28,44  | 30,62  | 27,32    |
| 08B      | 32,76 | 31,38  | 29,64 | 27,27  | 24,3   | 26,8     |
| 08C      | 33,25 | 31,75  | 30,11 | 30,86  | 26,76  | 30,84    |
| 09A      | 35,18 | 34,63  | 32,12 | 29,92  | 30,72  | 28,46    |
| 09B      | 35,28 | 34,24  | 33,45 | 29,72  | 28,62  | 28,84    |
| 09C      | 35,62 | 34,69  | 32,12 | 31,47  | 29,3   | 29,24    |
| 10A      | 37,52 | 37,09  | 35,89 | 33,74  | 31,07  | 31,49    |
| 10B      | 37,80 | 36,63  | 35,24 | 34,23  | 30,88  | 31,5     |
| 10C      | 38,00 | 35,71  | 34,35 | 34,59  | 31,96  | 32,59    |
| 11A      | 39,85 | 39,44  | 36,35 | 35,45  | 34,52  | 34,46    |
| 11B      | 40,32 | 37,51  | 36,13 | 35,64  | 33,79  | 34,8     |
| 11C      | 40,37 | 37,63  | 36,13 | 34,26  | 33,73  | 34,65    |
| 12A      | 42,18 | 41,95  | 42,7  | 40,65  | 39,5   | 39,71    |
| 12B      | 42,84 | 38,61  | 41,4  | 41,25  | 39,93  | 39,57    |
| 12C      | 42,74 | 41,93  | 40,98 | 40,52  | 42,2   | 39,43    |

Příloha 2 - Průměry variant celkového obsahu C v 1 kg sušiny v %

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 32,95       | 31,33                  | 28,32    |
| 9        | 35,36       | 34,52                  | 28,85    |
| 10       | 37,77       | 36,48                  | 31,86    |
| 11       | 40,18       | 38,19                  | 34,64    |
| 12       | 42,59       | 40,83                  | 39,57    |

Příloha 3 - Směrodatné odchylky variant celkového obsahu C v 1 kg sušiny v %

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 0,21        | 0,36                   | 1,79     |
| 9        | 0,19        | 0,20                   | 0,32     |
| 10       | 0,20        | 0,57                   | 0,52     |
| 11       | 0,23        | 0,88                   | 0,14     |
| 12       | 0,29        | 1,57                   | 0,11     |



Příloha 4 - Poměr C/N

| <b>Varianta</b> | <b>Před</b> | <b>Březen</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 6,16        | 6,27          | 6,68         | 8,29          | 9,68          | 8,31            |
| 08B             | 6,10        | 6,26          | 6,77         | 7,65          | 7,24          | 7,86            |
| 08C             | 6,17        | 6,27          | 7,01         | 8,66          | 8,48          | 8,15            |
| 09A             | 20,10       | 9,28          | 8,93         | 9,25          | 11,07         | 9,99            |
| 09B             | 16,32       | 9,09          | 9,11         | 9,50          | 9,48          | 9,66            |
| 09C             | 17,66       | 9,70          | 8,62         | 10,30         | 10,72         | 10,22           |
| 10A             | 28,84       | 15,38         | 12,90        | 13,20         | 11,09         | 11,48           |
| 10B             | 26,53       | 14,51         | 13,05        | 13,65         | 11,85         | 11,42           |
| 10C             | 29,15       | 13,16         | 14,45        | 12,87         | 11,41         | 11,05           |
| 11A             | 37,69       | 18,46         | 14,60        | 13,27         | 10,64         | 11,32           |
| 11B             | 36,74       | 17,14         | 13,73        | 12,59         | 12,31         | 11,70           |
| 11C             | 40,64       | 17,23         | 13,15        | 11,49         | 11,57         | 11,01           |
| 12A             | 50,55       | 52,45         | 29,38        | 25,40         | 22,08         | 16,59           |
| 12B             | 46,96       | 49,58         | 28,24        | 28,49         | 22,09         | 19,19           |
| 12C             | 52,13       | 48,40         | 32,00        | 26,27         | 20,00         | 19,13           |

Příloha 5 - Průměry C/N ve variantách

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 6,14               | 6,27                          | 8,10            |
| 9               | 18,03              | 9,36                          | 9,96            |
| 10              | 28,17              | 14,35                         | 11,32           |
| 11              | 38,36              | 17,61                         | 11,34           |
| 12              | 49,88              | 50,14                         | 18,30           |

Příloha 6 - Směrodatné odchylky C/N ve variantách

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 0,03               | 0,01                          | 0,19            |
| 9               | 1,57               | 0,25                          | 0,23            |
| 10              | 1,17               | 0,91                          | 0,19            |
| 11              | 1,66               | 0,60                          | 0,28            |
| 12              | 2,16               | 1,70                          | 1,21            |

Příloha 7 - Celkový obsah Mg v sušině mg/kg

| Varianta | Před | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 5061 | 5773   | 2555  | 5086   | 5964   | 6312     |
| 08B      | 4407 | 5454   | 5516  | 6862   | 6907   | 5859     |
| 08C      | 5111 | 5546   | 4581  | 5709   | 6840   | 6666     |
| 09A      | 4034 | 4341   | 4179  | 5410   | 4751   | 5615     |
| 09B      | 3538 | 4298   | 4969  | 5386   | 5688   | 5239     |
| 09C      | 4068 | 4390   | 4185  | 4744   | 5631   | 5700     |
| 10A      | 3008 | 3532   | 3545  | 4407   | 5117   | 4976     |
| 10B      | 2670 | 3319   | 3971  | 3786   | 5012   | 4608     |
| 10C      | 3026 | 2955   | 3587  | 4445   | 4758   | 4772     |
| 11A      | 1982 | 2780   | 3292  | 3804   | 4193   | 4018     |
| 11B      | 1801 | 2801   | 3155  | 3948   | 4460   | 3930     |
| 11C      | 1983 | 2555   | 3543  | 4014   | 4436   | 4306     |
| 12A      | 955  | 1206   | 1382  | 1721   | 2236   | 2822     |
| 12B      | 932  | 1129   | 1200  | 1509   | 2157   | 3018     |
| 12C      | 941  | 1222   | 1268  | 1308   | 2200   | 3272     |

Příloha 8 - Průměry variant celkového obsahu Mg v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 4860        | 5591                   | 6279     |
| 9        | 3880        | 4343                   | 5518     |
| 10       | 2901        | 3269                   | 4785     |
| 11       | 1922        | 2712                   | 4084     |
| 12       | 943         | 1186                   | 3037     |

Příloha 9 - Směrodatné odchylky variant celkového obsahu Mg v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 320,70      | 134,03                 | 330,16   |
| 9        | 242,29      | 37,50                  | 200,19   |
| 10       | 163,90      | 238,07                 | 150,52   |
| 11       | 85,59       | 111,33                 | 160,54   |
| 12       | 9,52        | 40,45                  | 184,01   |

Příloha 10 - Celkový obsah přístupného Mg v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Před</b> | <b>Březen</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 491         | 417           | 376          | 1060          | 733           | 2230            |
| 08B             | 495         | 293           | 352          | 1180          | 699           | 2370            |
| 08C             | 519         | 177           | 321          | 757           | 619           | 2320            |
| 09A             | 510         | 488           | 654          | 1640          | 520           | 1700            |
| 09B             | 513         | 580           | 388          | 1570          | 2070          | 1810            |
| 09C             | 532         | 474           | 486          | 1420          | 1780          | 1930            |
| 10A             | 530         | 578           | 384          | 983           | 561           | 1763            |
| 10B             | 531         | 525           | 744          | 1050          | 494           | 1780            |
| 10C             | 545         | 513           | 551          | 1190          | 1400          | 1750            |
| 11A             | 549         | 698           | 526          | 892           | 1020          | 1200            |
| 11B             | 549         | 739           | 526          | 887           | 1160          | 1200            |
| 11C             | 558         | 716           | 353          | 934           | 1050          | 1340            |
| 12A             | 569         | 468           | 182          | 488           | 522           | 518             |
| 12B             | 567         | 463           | 200          | 491           | 484           | 434             |
| 12C             | 572         | 460           | 469          | 486           | 490           | 404             |

Příloha 11 - Průměry variant přístupného obsahu Mg v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 501                | 295                           | 2306            |
| 9               | 518                | 514                           | 1813            |
| 10              | 535                | 538                           | 1764            |
| 11              | 552                | 717                           | 1246            |
| 12              | 569                | 463                           | 452             |

Příloha 12 - Směrodatné odchylky přístupného obsahu Mg v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 12,36              | 98,00                         | 57,93           |
| 9               | 9,72               | 47,02                         | 93,93           |
| 10              | 7,08               | 28,24                         | 12,28           |
| 11              | 4,48               | 16,78                         | 66,00           |
| 12              | 2,05               | 3,30                          | 48,25           |

Příloha 13 - Celkový obsah K v sušině v mg/kg

| Varianta | Před | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 5029 | 5774   | 2446  | 9359   | 13018  | 11583    |
| 08B      | 5088 | 5317   | 6991  | 10600  | 9403   | 11299    |
| 08C      | 5047 | 5469   | 6820  | 9629   | 14146  | 11812    |
| 09A      | 5297 | 6179   | 8054  | 10229  | 12488  | 12586    |
| 09B      | 5272 | 6451   | 6972  | 10410  | 11787  | 11929    |
| 09C      | 5307 | 6440   | 7208  | 10802  | 12076  | 12450    |
| 10A      | 5565 | 8008   | 9944  | 13361  | 15858  | 14363    |
| 10B      | 5456 | 7830   | 10871 | 13398  | 13962  | 14822    |
| 10C      | 5568 | 7209   | 12195 | 14758  | 15139  | 15481    |
| 11A      | 5833 | 9278   | 13238 | 15588  | 16962  | 23390    |
| 11B      | 5640 | 9467   | 12094 | 15698  | 17709  | 21742    |
| 11C      | 5829 | 9366   | 13930 | 14009  | 18251  | 20114    |
| 12A      | 6101 | 7717   | 10274 | 11395  | 13344  | 25045    |
| 12B      | 5824 | 7238   | 9846  | 12556  | 14368  | 22974    |
| 12C      | 6090 | 7264   | 10361 | 12978  | 12878  | 26316    |

Příloha 14 - Průměry variant celkového obsahu K v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 5055        | 5520                   | 11564    |
| 9        | 5292        | 6357                   | 12322    |
| 10       | 5530        | 7682                   | 14889    |
| 11       | 5767        | 9371                   | 21748    |
| 12       | 6005        | 7407                   | 24778    |

Příloha 15 - Směrodatné odchylky variant celkového obsahu K v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 5055        | 5520                   | 11564    |
| 9        | 5292        | 6357                   | 12322    |
| 10       | 5530        | 7682                   | 14889    |
| 11       | 5767        | 9371                   | 21748    |
| 12       | 6005        | 7407                   | 24778    |

Příloha 16 - Celkový obsah přístupného K v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Před</b> | <b>Březen</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 2100        | 2210          | 2630         | 4890          | 2370          | 6750            |
| 08B             | 2130        | 2060          | 2700         | 4320          | 1520          | 6550            |
| 08C             | 2040        | 2030          | 2740         | 4680          | 2610          | 6100            |
| 09A             | 2990        | 3220          | 4010         | 6220          | 1930          | 8498            |
| 09B             | 2915        | 3480          | 5340         | 6340          | 7600          | 8700            |
| 09C             | 2865        | 3050          | 3410         | 7110          | 7590          | 8290            |
| 10A             | 3880        | 4260          | 3230         | 7750          | 3510          | 9420            |
| 10B             | 3700        | 4340          | 6170         | 7790          | 2740          | 10840           |
| 10C             | 3690        | 4210          | 5320         | 8420          | 9570          | 10220           |
| 11A             | 4770        | 6210          | 7620         | 11130         | 12050         | 12130           |
| 11B             | 4485        | 6590          | 6520         | 9970          | 12930         | 11810           |
| 11C             | 4515        | 6570          | 3940         | 10200         | 12190         | 11974           |
| 12A             | 5660        | 4490          | 2470         | 9150          | 10780         | 11720           |
| 12B             | 5270        | 4600          | 3090         | 8610          | 10600         | 12210           |
| 12C             | 5340        | 4820          | 6820         | 8090          | 10530         | 12670           |

Příloha 17 - Průměry variant přístupného obsahu K v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 2090               | 2100                          | 6466            |
| 9               | 2923               | 3250                          | 8496            |
| 10              | 3756               | 4270                          | 10160           |
| 11              | 4590               | 6456                          | 11971           |
| 12              | 5423               | 4636                          | 12200           |

Příloha 18 - Směrodatné odchylky přístupného obsahu K v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 37,42              | 78,74                         | 271,83          |
| 9               | 51,37              | 176,82                        | 167,39          |
| 10              | 87,31              | 53,54                         | 581,26          |
| 11              | 127,87             | 174,61                        | 130,65          |
| 12              | 169,77             | 137,19                        | 387,90          |

Příloha 19 - Celkový obsah Ca v sušině v mg/kg

| Varianta | Před  | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|-------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 15012 | 17326  | 8557  | 17936  | 19348  | 21562    |
| 08B      | 12839 | 16277  | 17723 | 2138   | 21210  | 20024    |
| 08C      | 15284 | 16461  | 15578 | 19963  | 20708  | 22037    |
| 09A      | 12291 | 13238  | 13246 | 18014  | 15858  | 18231    |
| 09B      | 10643 | 12987  | 14851 | 18516  | 18238  | 16277    |
| 09C      | 12491 | 13681  | 13495 | 17705  | 18193  | 17500    |
| 10A      | 9571  | 11567  | 11674 | 16296  | 17183  | 17023    |
| 10B      | 8447  | 10696  | 13731 | 14927  | 17037  | 16231    |
| 10C      | 9699  | 9605   | 13375 | 17317  | 16398  | 15147    |
| 11A      | 6850  | 9788   | 12561 | 15958  | 15770  | 16771    |
| 11B      | 6250  | 9729   | 11458 | 16646  | 16727  | 17101    |
| 11C      | 6906  | 8972   | 12962 | 16832  | 16605  | 16437    |
| 12A      | 4129  | 5180   | 6129  | 7843   | 9558   | 11662    |
| 12B      | 4054  | 4802   | 5443  | 6930   | 8977   | 12439    |
| 12C      | 4113  | 5413   | 5655  | 5525   | 9351   | 14031    |

Příloha 20 - Průměry variant celkového obsahu Ca v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 14378       | 16688                  | 21208    |
| 9        | 11808       | 13302                  | 17336    |
| 10       | 9239        | 10623                  | 16134    |
| 11       | 6669        | 9496                   | 16770    |
| 12       | 4099        | 5132                   | 12711    |

Příloha 21 - Směrodatné odchyly variant celkového obsahu Ca v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 1094,11     | 457,34                 | 858,97   |
| 9        | 828,28      | 286,81                 | 806,08   |
| 10       | 562,47      | 802,36                 | 768,95   |
| 11       | 296,71      | 371,20                 | 271,28   |
| 12       | 32,30       | 251,80                 | 986,23   |

Příloha 22 - Celkový obsah P v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Před</b> | <b>Březen</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 17156       | 17191         | 9841         | 22113         | 22174         | 23250           |
| 08B             | 14691       | 15847         | 18221        | 28615         | 27322         | 21805           |
| 08C             | 16646       | 18550         | 18719        | 24453         | 28171         | 24938           |
| 09A             | 13048       | 13546         | 16728        | 21936         | 18656         | 21402           |
| 09B             | 11197       | 12926         | 18811        | 22381         | 23014         | 21332           |
| 09C             | 12657       | 13336         | 16604        | 19513         | 22834         | 21062           |
| 10A             | 8939        | 9888          | 12224        | 16049         | 17245         | 15952           |
| 10B             | 7703        | 9413          | 14285        | 13713         | 17160         | 12251           |
| 10C             | 8668        | 8312          | 10812        | 13841         | 16955         | 14716           |
| 11A             | 4831        | 6670          | 9220         | 9587          | 11980         | 10076           |
| 11B             | 4209        | 6650          | 9007         | 11200         | 11948         | 9577            |
| 11C             | 4679        | 5792          | 10061        | 9289          | 12132         | 11375           |
| 12A             | 723         | 889           | 1314         | 2267          | 2267          | 3138            |
| 12B             | 715         | 932           | 1594         | 1825          | 2294          | 3323            |
| 12C             | 690         | 944           | 1064         | 1589          | 2200          | 4142            |

Příloha 23 - Průměry variant celkového obsahu P v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 16164              | 17196                         | 23331           |
| 9               | 12300              | 13270                         | 21265           |
| 10              | 8437               | 9204                          | 14306           |
| 11              | 4573               | 6371                          | 10342           |
| 12              | 709                | 921                           | 3534            |

Příloha 24 - Směrodatné odchylky variant celkového obsahu P v sušině v mg/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 1062,51            | 1103,38                       | 1280,08         |
| 9               | 796,58             | 257,45                        | 146,57          |
| 10              | 530,68             | 659,78                        | 1538,54         |
| 11              | 264,89             | 409,48                        | 757,82          |
| 12              | 13,77              | 23,63                         | 436,03          |

Příloha 25 - Celkový obsah přístupného P v sušině v mg/kg

| Varianta | Před  | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|-------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 449   | 913    | 637   | 737    | 431    | 845      |
| 08B      | 270   | 805    | 713   | 842    | 399    | 993      |
| 08C      | 394   | 582    | 846   | 1050   | 455    | 935      |
| 09A      | 395   | 586    | 375   | 979    | 385    | 796      |
| 09B      | 272   | 745    | 498   | 978    | 873    | 874      |
| 09C      | 349   | 533    | 441   | 1000   | 814    | 885      |
| 10A      | 341   | 1070   | 452   | 1110   | 541    | 1160     |
| 10B      | 274   | 1080   | 829   | 1110   | 444    | 1160     |
| 10C      | 305   | 753    | 381   | 1150   | 1010   | 1140     |
| 11A      | 287   | 1010   | 459   | 1120   | 1250   | 1520     |
| 11B      | 276   | 1160   | 580   | 1410   | 1380   | 1430     |
| 11C      | 260,5 | 1110   | 165   | 1300   | 1130   | 1330     |
| 12A      | 234   | 163    | 122   | 443    | 492    | 475      |
| 12B      | 228   | 150    | 100   | 426    | 482    | 461      |
| 12C      | 216   | 157    | 173   | 404    | 458    | 605      |

Příloha 26 - Průměry variant přístupného obsahu P v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 371         | 766                    | 924      |
| 9        | 338         | 621                    | 851      |
| 10       | 306         | 967                    | 1153     |
| 11       | 274         | 1093                   | 1426     |
| 12       | 226         | 156                    | 513      |

Příloha 27 - Směrodatné odchylky přístupného obsahu P v sušině v mg/kg

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 74,86       | 137,82                 | 60,89    |
| 9        | 50,87       | 90,08                  | 39,62    |
| 10       | 27,59       | 151,85                 | 9,43     |
| 11       | 11,16       | 62,36                  | 77,60    |
| 12       | 7,48        | 5,31                   | 64,83    |



## Příloha 28 - pH

| <b>Varianta</b> | <b>Před</b> | <b>Březen</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 7,01        | 8,40          | 8,44         | 5,96          | 5,30          | 5,50            |
| 08B             | 7,01        | 8,30          | 8,49         | 6,68          | 5,27          | 5,60            |
| 08C             | 6,96        | 8,34          | 8,35         | 7,11          | 5,50          | 5,22            |
| 09A             | 7,28        | 8,37          | 8,31         | 5,89          | 5,90          | 5,13            |
| 09B             | 7,24        | 8,27          | 8,80         | 6,12          | 5,30          | 5,10            |
| 09C             | 7,44        | 8,22          | 8,19         | 6,18          | 5,43          | 5,31            |
| 10A             | 7,55        | 8,22          | 8,23         | 5,75          | 5,61          | 5,86            |
| 10B             | 7,46        | 8,11          | 7,98         | 6,77          | 5,70          | 5,61            |
| 10C             | 7,93        | 8,13          | 8,03         | 5,97          | 5,05          | 5,90            |
| 11A             | 7,82        | 7,79          | 7,96         | 6,37          | 5,76          | 5,60            |
| 11B             | 7,69        | 7,11          | 8,02         | 6,09          | 6,12          | 5,70            |
| 11C             | 8,41        | 7,09          | 8,22         | 6,42          | 5,55          | 5,95            |
| 12A             | 8,09        | 8,19          | 8,34         | 8,11          | 7,18          | 8,35            |
| 12B             | 7,91        | 8,13          | 8,34         | 8,42          | 7,48          | 8,35            |
| 12C             | 8,89        | 8,10          | 8,41         | 8,01          | 7,28          | 8,32            |

## Příloha 29 - Průměrné pH variant

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 6,99               | 8,35                          | 5,44            |
| 9               | 7,32               | 8,29                          | 5,18            |
| 10              | 7,64               | 8,15                          | 5,79            |
| 11              | 7,97               | 7,33                          | 5,75            |
| 12              | 8,30               | 8,14                          | 8,34            |

## Příloha 30 - Směrodatné odchylky pH variant

| <b>Varianta</b> | <b>Začátek PKO</b> | <b>Konec PKO a začátek VK</b> | <b>Konec VK</b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 8               | 0,02               | 0,04                          | 0,16            |
| 9               | 0,09               | 0,06                          | 0,09            |
| 10              | 0,20               | 0,05                          | 0,13            |
| 11              | 0,31               | 0,32                          | 0,15            |
| 12              | 0,43               | 0,04                          | 0,01            |

Příloha 31 - Elektrická vodivost v  $\mu\text{s/cm}$ 

| Varianta | Před | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 682  | 1975   | 1242  | 1130   | 1911   | 1879     |
| 08B      | 491  | 1919   | 1332  | 1399   | 1874   | 2131     |
| 08C      | 679  | 1824   | 1291  | 610    | 1105   | 2400     |
| 09A      | 697  | 1134   | 1071  | 1794   | 1468   | 1994     |
| 09B      | 541  | 1291   | 951   | 1296   | 1869   | 2100     |
| 09C      | 661  | 1459   | 1136  | 1704   | 1259   | 2220     |
| 10A      | 712  | 1287   | 548   | 989    | 1174   | 2390     |
| 10B      | 591  | 1261   | 404   | 1140   | 1577   | 2120     |
| 10C      | 643  | 1060   | 452   | 1557   | 1822   | 2253     |
| 11A      | 726  | 494    | 570   | 1086   | 1403   | 2120     |
| 11B      | 641  | 353    | 501   | 971    | 1597   | 2480     |
| 11C      | 625  | 306    | 616   | 1233   | 1772   | 2249     |
| 12A      | 741  | 570    | 617   | 710    | 628    | 1156     |
| 12B      | 691  | 504    | 608   | 854    | 628    | 1276     |
| 12C      | 607  | 457    | 668   | 528    | 732    | 1025     |

Příloha 32 - Průměrná elektrická vodivost variant v  $\mu\text{s/cm}$ 

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 617         | 1906                   | 2136     |
| 9        | 632         | 1294                   | 2104     |
| 10       | 648         | 1202                   | 2254     |
| 11       | 664         | 384                    | 2283     |
| 12       | 679         | 510                    | 1152     |

Příloha 33 - Směrodatné odchylky variant elektrické vodivosti v  $\mu\text{s/cm}$ 

| Varianta | Začátek PKO | Konec PKO a začátek VK | Konec VK |
|----------|-------------|------------------------|----------|
| 8        | 89,34       | 62,33                  | 212,74   |
| 9        | 66,61       | 132,71                 | 92,32    |
| 10       | 49,35       | 101,44                 | 110,23   |
| 11       | 44,44       | 79,88                  | 148,92   |
| 12       | 55,29       | 46,35                  | 102,50   |

Příloha 34 - Počet žížal ve vermikompostu v ks/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 30           | 172           | 68            | 62              |
| 08B             | 18           | 104           | 36            | 72              |
| 08C             | 16           | 26            | 48            | 48              |
| 09A             | 44           | 188           | 86            | 92              |
| 09B             | 8            | 234           | 48            | 50              |
| 09C             | 36           | 72            | 140           | 80              |
| 10A             | 108          | 176           | 128           | 80              |
| 10B             | 52           | 162           | 74            | 92              |
| 10C             | 80           | 138           | 128           | 36              |
| 11A             | 162          | 186           | 134           | 122             |
| 11B             | 144          | 124           | 94            | 64              |
| 11C             | 124          | 118           | 166           | 54              |
| 12A             | 46           | 92            | 78            | 124             |
| 12B             | 68           | 58            | 76            | 120             |
| 12C             | 54           | 136           | 112           | 116             |

Příloha 35 – Hmotnost žížal ve vermikompostu v g/kg

| <b>Varianta</b> | <b>Duben</b> | <b>Květen</b> | <b>Červen</b> | <b>Červenec</b> |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 08A             | 7,0          | 38,8          | 22,4          | 22,4            |
| 08B             | 4,2          | 53,0          | 11,0          | 15,8            |
| 08C             | 8,4          | 11,8          | 22,0          | 16,4            |
| 09A             | 13,2         | 46,8          | 21,8          | 15,2            |
| 09B             | 0,6          | 51,8          | 12,4          | 8,6             |
| 09C             | 2,6          | 18,6          | 38,6          | 16,8            |
| 10A             | 26,0         | 28,0          | 23,4          | 19,4            |
| 10B             | 13,0         | 31,4          | 20,0          | 15,2            |
| 10C             | 20,4         | 32,0          | 19,2          | 6,8             |
| 11A             | 32,0         | 27,2          | 24,8          | 22,6            |
| 11B             | 44,4         | 23,6          | 22,0          | 11,4            |
| 11C             | 29,6         | 26,8          | 24,6          | 6,4             |
| 12A             | 10,0         | 15,6          | 14,8          | 22,2            |
| 12B             | 13,0         | 14,6          | 16,8          | 26,8            |
| 12C             | 8,6          | 23,6          | 22,4          | 29,2            |

Příloha 36 - Suchá hmotnost vzorků v g/kg čerstvého vzorku

| Varianta | Suchá hmotnost v g na 1 kg |        |       |        |        |          | Substrátu |
|----------|----------------------------|--------|-------|--------|--------|----------|-----------|
|          | Před                       | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec | Červenec  |
| 08A      | 131,0                      | 131,5  | 149,5 | 163,0  | 233,5  | 226,5    | 306,5     |
| 08B      | 134,5                      | 131,0  | 147,0 | 173,5  | 216,5  | 234,0    | 266,0     |
| 08C      | 134,0                      | 130,5  | 147,5 | 146,5  | 186,0  | 226,5    | 255,5     |
| 09A      | 151,6                      | 136,5  | 147,5 | 191,5  | 206,0  | 194,5    | 268,5     |
| 09B      | 155,1                      | 135,5  | 154,0 | 197,0  | 206,0  | 221,0    | 278,5     |
| 09C      | 152,0                      | 133,5  | 162,0 | 176,0  | 206,0  | 222,5    | 270,5     |
| 10A      | 172,3                      | 145,5  | 163,5 | 194,5  | 186,0  | 189,0    | 278,5     |
| 10B      | 175,8                      | 147,0  | 154,0 | 195,5  | 194,5  | 229,5    | 282,5     |
| 10C      | 170,0                      | 144,0  | 166,5 | 206,5  | 198,5  | 243,5    | 274,0     |
| 11A      | 192,9                      | 143,5  | 158,0 | 181,0  | 194,0  | 208,5    | 270,0     |
| 11B      | 196,4                      | 140,0  | 162,0 | 184,5  | 198,0  | 231,5    | 289,0     |
| 11C      | 188,0                      | 140,5  | 159,0 | 194,0  | 214,0  | 293,5    | 336,0     |
| 12A      | 213,5                      | 185,5  | 196,5 | 180,5  | 145,5  | 141,0    | 272,5     |
| 12B      | 217,0                      | 184,5  | 200,0 | 204,5  | 181,0  | 180,0    | 310,0     |
| 12C      | 206,0                      | 184,0  | 205,0 | 203,5  | 183,5  | 191,5    | 297,5     |

Příloha 37 - Úbytek vlhké hmotnosti během vermikompostování v kg

| Varianta | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec |
|----------|--------|-------|--------|--------|----------|
| 08A      | 9,0    | 5,3   | 3,2    | 3,6    | 3,1      |
| 08B      | 9,0    | 6,3   | 4,2    | 2,5    | 2,6      |
| 08C      | 9,0    | 5,7   | 4,8    | 3,3    | 2,1      |
| 09A      | 9,0    | 7,1   | 4,6    | 3,9    | 3,8      |
| 09B      | 9,0    | 6,8   | 4,5    | 3,5    | 2,7      |
| 09C      | 9,0    | 6,9   | 5,4    | 3,7    | 3,6      |
| 10A      | 9,0    | 4,8   | 3,8    | 2,9    | 2,3      |
| 10B      | 9,0    | 5,1   | 3,5    | 2,5    | 2,6      |
| 10C      | 9,0    | 4,9   | 3,4    | 2,4    | 2,6      |
| 11A      | 9,0    | 4,4   | 3,4    | 2,4    | 1,7      |
| 11B      | 9,0    | 4,0   | 3,3    | 2,4    | 1,8      |
| 11C      | 9,0    | 4,5   | 3,4    | 2,5    | 1,7      |
| 12A      | 9,0    | 6,9   | 6,5    | 5,6    | 4,8      |
| 12B      | 9,0    | 6,4   | 5,6    | 4,7    | 4,4      |
| 12C      | 9,0    | 6,7   | 5,9    | 5,0    | 3,9      |

Příloha 38 - Průměrné teploty dnů v aerobních fermentorech ve °C

| Měření  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5.3.20  | 8,06  | 18,35 | 23,80 | 26,45 | 36,06 | 6,26  | 15,25 | 22,08 | 25,56 | 39,29 |
| 6.3.20  | 15,13 | 21,81 | 30,26 | 39,66 | 46,40 | 12,37 | 18,56 | 25,18 | 41,19 | 39,73 |
| 7.3.20  | 19,29 | 24,26 | 36,89 | 48,47 | 51,08 | 17,58 | 21,67 | 25,14 | 43,10 | 32,18 |
| 8.3.20  | 20,46 | 25,49 | 42,77 | 59,42 | 52,88 | 20,16 | 23,46 | 30,74 | 47,40 | 30,79 |
| 9.3.20  | 22,70 | 27,14 | 46,10 | 60,82 | 50,60 | 22,93 | 25,45 | 38,24 | 49,51 | 36,41 |
| 10.3.20 | 24,22 | 28,08 | 48,21 | 59,49 | 51,79 | 24,95 | 27,01 | 43,53 | 55,11 | 43,47 |
| 11.3.20 | 25,76 | 28,49 | 50,20 | 57,79 | 56,05 | 26,19 | 27,92 | 47,07 | 60,32 | 54,49 |
| 12.3.20 | 27,67 | 29,59 | 51,71 | 56,58 | 59,49 | 27,85 | 29,24 | 50,15 | 60,19 | 58,19 |
| 13.3.20 | 29,46 | 30,78 | 51,32 | 55,25 | 60,44 | 29,43 | 30,59 | 51,69 | 59,25 | 58,07 |
| 14.3.20 | 30,86 | 31,91 | 49,39 | 53,67 | 59,68 | 30,71 | 31,73 | 52,21 | 58,06 | 59,97 |
| 15.3.20 | 31,78 | 32,67 | 46,78 | 51,71 | 56,41 | 31,54 | 32,44 | 51,70 | 56,27 | 60,85 |
| 16.3.20 | 31,86 | 32,56 | 43,98 | 46,92 | 51,12 | 31,52 | 32,09 | 49,65 | 53,10 | 58,11 |
| 17.3.20 | 31,01 | 31,60 | 41,44 | 42,73 | 44,46 | 30,56 | 30,83 | 46,49 | 48,81 | 53,15 |
| 18.3.20 | 30,47 | 30,91 | 40,32 | 41,04 | 40,40 | 30,05 | 30,27 | 44,58 | 46,38 | 49,14 |

Příloha 39 - Směrodatné odchylky teplot ve dnech v aerobních fermentorech ve °C

| Měření  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    |
|---------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| 5.3.20  | 2,46 | 1,69 | 3,68 | 6,83 | 10,55 | 1,37 | 1,41 | 5,78 | 7,57 | 15,06 |
| 6.3.20  | 1,68 | 0,96 | 2,05 | 4,41 | 2,04  | 1,97 | 1,03 | 0,24 | 2,62 | 3,26  |
| 7.3.20  | 0,77 | 0,50 | 2,13 | 6,95 | 3,08  | 1,01 | 0,71 | 0,42 | 5,64 | 1,40  |
| 8.3.20  | 0,72 | 0,53 | 1,20 | 0,37 | 0,87  | 0,84 | 0,56 | 2,44 | 1,05 | 1,00  |
| 9.3.20  | 0,56 | 0,43 | 0,70 | 0,26 | 0,28  | 0,74 | 0,56 | 1,83 | 0,31 | 1,73  |
| 10.3.20 | 0,32 | 0,18 | 0,67 | 2,34 | 0,87  | 0,34 | 0,27 | 1,27 | 5,25 | 3,12  |
| 11.3.20 | 0,53 | 0,27 | 0,64 | 0,39 | 1,49  | 0,45 | 0,34 | 1,01 | 0,08 | 2,15  |
| 12.3.20 | 0,55 | 0,34 | 0,15 | 0,36 | 0,47  | 0,48 | 0,40 | 0,62 | 0,19 | 0,26  |
| 13.3.20 | 0,47 | 0,34 | 0,41 | 0,42 | 0,10  | 0,42 | 0,38 | 0,30 | 0,34 | 0,17  |
| 14.3.20 | 0,34 | 0,29 | 0,64 | 0,50 | 0,62  | 0,32 | 0,28 | 0,07 | 0,39 | 0,78  |
| 15.3.20 | 0,19 | 0,15 | 0,82 | 0,63 | 1,24  | 0,16 | 0,13 | 0,35 | 0,67 | 0,37  |
| 16.3.20 | 0,21 | 0,28 | 0,93 | 2,72 | 1,87  | 0,27 | 0,47 | 0,91 | 1,30 | 1,36  |
| 17.3.20 | 0,22 | 0,22 | 0,54 | 0,69 | 1,77  | 0,22 | 0,25 | 0,83 | 1,03 | 1,41  |
| 18.3.20 | 0,09 | 0,51 | 0,15 | 0,52 | 0,62  | 0,08 | 0,09 | 0,30 | 0,40 | 1,30  |

Příloha 40 - Změna parametrů během procesů PKO a VK, souhrnná tabulka část první

| <b>Změna parametrů během procesu</b> |  |  |                      |
|--------------------------------------|--|--|----------------------|
| <b>Varianta</b>                      | <b>Rozdíl mezi začátkem a koncem PKO</b>                 | <b>Rozdíl mezi koncem PKO a koncem VKP</b> | <b>Rozdíl celkem</b> |
|                                      | <b>Celkový obsah C v sušině v %</b>                      |  |                      |
| 8                                    | -1,62  | -3,01                                      | -4,63                |
| 9                                    | -0,84  | -5,67                                      | -6,52                |
| 10                                   | -1,29  | -4,62                                      | -5,91                |
| 11                                   | -1,99  | -3,56                                      | -5,54                |
| 12                                   | -1,76  | -1,26                                      | -3,02                |
| <b>Varianta</b>                      | <b>Poměr C/N</b>   |  |                      |
| 8                                    | 0,12   | 1,84                                       | 1,96                 |
| 9                                    | -8,67  | 0,60                                       | -8,07                |
| 10                                   | -13,82   | -3,03                                      | -16,86               |
| 11                                   | -20,75   | -6,27                                      | -27,02               |
| 12                                   | 0,27   | -31,84                                     | -31,58               |
| <b>Varianta</b>                      | <b>Celkový obsah Ca v mg/kg sušiny</b>                   |  |                      |
| 8                                    | 2309,96  | 4519,27                                    | 6829,23              |
| 9                                    | 1493,81  | 4033,68                                    | 5527,49              |
| 10                                   | 1384,18  | 5511,01                                    | 6895,19              |
| 11                                   | 2827,34  | 7273,79                                    | 10101,13             |
| 12                                   | 1032,69  | 7579,01                                    | 8611,70              |
| <b>Varianta</b>                      | <b>Celkový obsah K v mg/kg sušiny</b>                    |  |                      |
| 8                                    | 465,22   | 6044,54                                    | 6509,76              |
| 9                                    | 1064,43  | 5965,29                                    | 7029,71              |
| 10                                   | 2152,25  | 7206,62                                    | 9358,88              |
| 11                                   | 3603,18  | 12377,98                                   | 15981,15             |
| 12                                   | 1401,73  | 17371,49                                   | 18773,22             |
| <b>Varianta</b>                      | <b>Přístupný obsah K z celkového obsahu v sušině v %</b> |  |                      |
| 8                                    | -3,30  | 17,92                                      | 14,62                |
| 9                                    | -4,10  | 17,87                                      | 13,77                |
| 10                                   | -12,26   | 12,57                                      | 0,31                 |
| 11                                   | -10,69   | -13,66                                     | -24,34               |
| 12                                   | -27,62   | -13,33                                     | -40,95               |
| <b>Varianta</b>                      | <b>Celkový obsah Mg v mg/kg sušiny</b>                   |  |                      |
| 8                                    | 731,56   | 688,12                                     | 1419,68              |
| 9                                    | 462,63   | 1174,98                                    | 1637,62              |
| 10                                   | 367,34   | 1516,50                                    | 1883,84              |
| 11                                   | 790,14   | 1372,31                                    | 2162,45              |
| 12                                   | 242,76   | 1851,54                                    | 2094,30              |

Příloha 41 - Změna parametrů během procesů PKO a VK, souhrnná tabulka část druhá

|                 | <b>Rozdíl mezi začátkem a koncem PKO</b>                  | <b>Rozdíl mezi koncem PKO a koncem VKP</b> | <b>Rozdíl celkem</b> |
|-----------------|---|--|----------------------|
| <b>Varianta</b> | <b>Přístupný obsah Mg z celkového obsahu v sušině v %</b> |  |                      |
| 8               | -5,10   | 31,60                                      | 26,49                |
| 9               | -1,57   | 21,05                                      | 19,48                |
| 10              | -2,00   | 20,40                                      | 18,40                |
| 11              | -2,29   | 4,01                                       | 1,72                 |
| 12              | -21,22  | -24,11                                     | -45,33               |
| <b>Varianta</b> | <b>Celkový obsah P v mg/kg sušiny</b>                     |  |                      |
| 8               | 1031,60   | 6135,04                                    | 7166,64              |
| 9               | 969,17  | 7995,66                                    | 8964,83              |
| 10              | 767,49  | 5102,10                                    | 5869,59              |
| 11              | 1797,63   | 3971,67                                    | 5769,30              |
| 12              | 212,31  | 2612,81                                    | 2825,12              |
| <b>Varianta</b> | <b>Přístupný obsah P z celkového obsahu v sušině v %</b>  |  |                      |
| 8               | 2,24  | -0,53                                      | 1,71                 |
| 9               | 1,96  | -0,69                                      | 1,27                 |
| 10              | 6,82  | -2,29                                      | 4,53                 |
| 11              | 11,22   | -3,35                                      | 7,88                 |
| 12              | -14,82  | -2,48                                      | -17,30               |
| <b>Varianta</b> | <b>pH</b>   |  |                      |
| 8               | 1,36  | -2,91                                      | -1,55                |
| 9               | 0,97  | -3,11                                      | -2,14                |
| 10              | 0,51  | -2,37                                      | -1,86                |
| 11              | -0,65   | -1,58                                      | -2,22                |
| 12              | -0,16   | 0,20                                       | 0,04                 |
| <b>Varianta</b> | <b>Elektrická vodivost v <math>\mu\text{s/cm}</math></b>  |  |                      |
| 8               | 1288,67   | 230,50                                     | 1519,17              |
| 9               | 661,62  | 810,13                                     | 1471,75              |
| 10              | 554,17  | 1051,67                                    | 1605,83              |
| 11              | -279,75   | 1898,67                                    | 1618,92              |
| 12              | -169,33   | 641,83                                     | 472,50               |