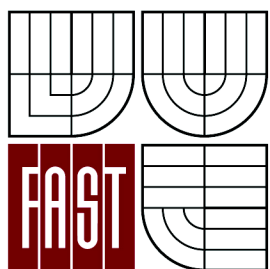


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

KOMPOSTOVÁNÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ MALÝCH PRODUCENTŮ

COMPOSTING OF SEWAGE SLUDGE OF SMALL PRODUCERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

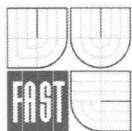
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAVA NĚMCOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Miroslava Němcová

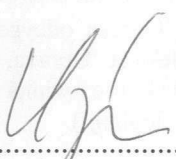
Název Kompostování čistírenských kalů malých producentů

Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.

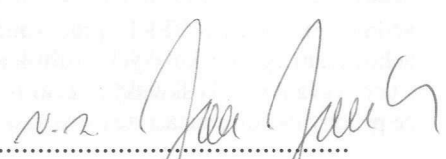
Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2012

Datum odevzdání bakalářské práce 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012


.....
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- ŠÁLEK, J., TLAPÁK, V.: Přírodní způsoby čištění znečištěných povrchových a odpadních vod, Praha 2006, 283 s., ISBN 80-86769-74-7
- ŠÁLEK, J., ŽÁKOVÁ, Z., HRNČÍŘ, P.: Přírodní čištění a využívání vody Brno: ERA, 115 s. ISBN 978-80-7366-125-0
- MLEJNSKÁ, E., ROZKOŠNÝ, M., BAUDIŠOVÁ, D., VÁŇA, M., WANNER, F., KUČERA, J.: Extenzivní způsoby čištění odpadních vod, VUV TGM v.v.i, Praha, 2009, 118s.
- VYMAZAL, J. a KRÖPFELOVÁ, L.: Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. 1998, Springer, Dordrecht, Nizozemí, 576 s.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Kořenové čistírny odpadních vod produkují každoročně výrazné množství biomasy. Rostliny, které jsou přítomné na kořenových polích, na konci vegetační sezony odumírají a často bývají ponechány přirozeným rozkladným procesům. Potřeba sklizení těchto částí rostlin je jasná. Zároveň je ale potřeba nalézt co možná nejlevnější a nejlepší řešení nakládání se zbytky rostlin v kombinaci s množstvím zahuštěného čistírenského kalu. Práce bude zpracována z větší části jako literární rešerše, popisující současný stav poznání v oblasti kompostování. Praktická část bude zaměřena na možnosti budování kompostů na kořenových čistírnách, popis skladby kompostů se zaměřením na chemické a bakteriální složení. Dále bude popsána intenzita přirozené mineralizace kalu při vynechání metody překopávání kompostu. V neposlední řadě se práce zaměří na instalaci vlhkostních čidel do různých hloubek kompostovaného materiálu, záznam naměřených hodnot bude zpracován a vyhodnocen.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce řeší problematiku kompostování směsi čistírenského kalu a biomasy mokřadních rostlin, které jsou jedním z produktů vznikajících na kořenových čistírnách odpadních vod.

Úvodní část práce je rešerší odborných informací autorů zabývajících se tématem zpracování čistírenských kalů a kompostováním. Podává základní informace o problematice kompostu a kompostování.

Praktická část práce, která navazuje na teoretické znalosti, je rozdělena do dvou samostatných celků. První z nich je zaměřen na sestavení metodiky výstavby kompostu na kořenové čistírně odpadních vod, umožňující využití jak zahuštěného čistírenského kalu, tak četného množství opadaných a odumřelých částí rostlin. Druhý celek se zabývá použitelností a testováním automatické jednotky, která sleduje vlhkost v kompostu. Výzkumné práce jsou zaměřeny na kalibraci půdních čidel. Výsledky měření budou statisticky vyhodnoceny a použity pro další práci s půdními snímači na kompostu.

Výsledky práce mohou posloužit podklady pro provozovatele a majitele kořenových čistíren odpadních vod, což povede k výraznému snížení provozních nákladů provozovatelů těchto čistíren.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompost, kompostování čistírenských kalů, kořenová čistírna odpadních vod, objemová vlhkost, hmotnostní vlhkost

ABSTRACT

This thesis deals with the composting of sewage sludge and wetland plants biomass wasted from treatment wetlands.

The introductory part of this thesis is the literature research of technical information from authors who deal with the topic of sewage sludge and composting. The introductory part provides basic information about the issue compost and composting.

The theoretical part of this thesis is followed by the practical part. The practical part is divided into two research projects. The first one is focuses on methodology of building compost from waste materials such as sewage sludge and wetland plants biomass. The second one deals with the testing and usability soil moisture sensors mostly used to monitoring of the compost humidity. The research work is focused on soil moisture sensors calibration. The measurement results will be statistically analyzed and used for further work with soil sensors of compost.

Results of the work can serve materials for operators and owners of treatment wetlands. This solution would lead to a significant reduction of operating costs when is considered sludge management.

KEY WORDS

Compost, composting of sewage sludge, treatment wetlands, volumetric water content, gravimetric water content

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

NĚMCOVÁ, Miroslava. *Kompostování čistírenských kalů malých producentů*. Brno, 2013. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Kříška, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20.5.2013

.....
podpis autora

Miroslava Němcová

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych tímto poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Michalu Kriškovi, Ph.D., za ochotu, odborné rady a připomínky.

Dále bych ráda poděkovala své rodině za podporu a trpělivost při tvorbě této práce a v průběhu celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	CÍLE	4
3	PROBLEMATIKA KOMPOSTŮ	5
3.1	KOMPOSTY A KOMPOSTOVÁNÍ	5
3.1.1	Kompostování čistírenských kalů	6
3.2	ZÁKLADNÍ FÁZE KOMPOSTOVÁNÍ	8
3.2.1	I. fáze - rozkladu	8
3.2.2	II. fáze - přeměnná	9
3.2.3	III. fáze - dozrávání	9
3.3	PROCESY PROBÍHAJÍCÍ V KOMPOSTECH	10
3.3.1	Mineralizace	10
3.3.2	Nitrifikace	10
3.3.3	Metanizace	11
3.4	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES KOMPOSTOVÁNÍ	13
3.4.1	Teplota	14
3.4.2	Vlhkost	15
3.4.3	Obsah kyslíku.....	16
3.4.4	Hodnota pH.....	17
3.4.5	Obsah živin a chemické složení	17
3.4.6	Poměr C:N.....	18
3.5	VÝHODY A NEVÝHODY KOMPOSTOVÁNÍ	19
4	METODIKA KOMPOSTOVÁNÍ	21
4.1	METODIKA KOMPOSTOVÁNÍ NA KČOV	21
4.1.1	Úprava podloží.....	22
4.1.2	První vrstva kompostu.....	23
4.1.3	Tvorba tělesa kompostu	23
4.1.4	Odvodnění.....	24
4.2	POPIS TĚLESA KOMPOSTU PO 7 MĚSÍCH	25

5	LABORATORNÍ MĚŘENÍ VLHKOSTI.....	27
5.1	VLHKOST KOMPOSTU	27
5.1.1	Hmotnostní vlhkost	28
5.1.2	Objemová vlhkost	28
5.2	METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI KOMPOSTU	29
5.2.1	Laboratorní - gravimetrická metoda	29
5.2.2	Přenosné provozní vlhkoměry	30
5.2.3	Orientační zkouška.....	30
5.3	VLASTNÍ LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....	31
5.3.1	Odběr vzorků.....	31
5.3.2	Místo laboratorního měření	32
5.3.3	Půdní vlhkoměry Virrib	32
5.3.4	Postup měření objemové vlhkosti	33
5.3.5	Výsledky měření	37
5.3.6	Měření vlhkosti gravimetrickou metodou	40
5.3.7	Zpracování naměřených dat	42
5.3.8	Výsledky laboratorního měření	47
5.3.9	Využití laboratorního měření	48
6	ZÁVĚR.....	49
7	POUŽITÁ LITERATURA	51
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	53
	SEZNAM TABULEK	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
	SUMMARY.....	57
	SEZNAM PŘÍLOH.....	58
	PŘÍLOHY	59

1 ÚVOD

Trendem současné moderní společnosti je návrat k přírodě blízkým řešením, sledování uhlíkové stopy různých technologických řešení a respektování přírodních zákonitostí a dějů. S těmito aspekty se můžeme setkat i v procesu čištění odpadních vod. Mezi přirozené a k přírodě šetrné způsoby čištění odpadních vod patří kořenové čistírny, využívající přírodních principů k procesu čištění.

Při procesu čištění odpadní vody, nejen na kořenových čistírnách, je jedním z produktů, kromě vyčištěné vody, také čistírenský kal. Úkolem čistírny je hospodaření s čistírenskými kaly. Metod finálního zpracování kalu je mnoha autory popsáno několik: různé způsoby spalování, ukládání na skládku nebo kompostování. Právě kompostování čistírenských kalů se v dnešní době, kdy politika Evropské unie potlačuje ukládání odpadu na skládku a podporuje jeho recyklaci a minimalizaci, jeví jako výhodné řešení, především pro malé, nejen kořenové, čistírny odpadních vod. Kompostování přináší řadu výhod, stejně tak má ale i své zápory.

Kompostování se jeví jako ekologicky nejpříjemnější forma finálního zpracování čistírenských kalů, jelikož nevyžaduje, ve srovnání s ostatními jmenovanými metodami, přísun externí energie ani chemikálií. Doplňuje tak koncepci zejména kořenových čistíren, které jsou založeny na přírodních procesech čištění.

2 CÍLE

První část práce, která je zpracovaná jako literární rešerše, by měla poskytnout základní informace týkající se kompostu a problematiky kompostování, se zaměřením na čistírenské kaly. Tyto informace by měly posloužit jako teoretický základ pro zpracování praktické části této práce.

Praktická část práce má hned několik cílů, které jsou zaměřeny na konkrétní kompost, který se nachází na kořenové čistírně odpadních vod v obci Dražovice. Postup při řešení praktické části práce bude popsán ve dvou samostatných kapitolách.

Prvním cílem praktické části je vytvoření metodiky výstavby kompostu na základě postupu přibudování reálného kompostu na kořenové čistírně v Dražovicích. Popis procesu zakládání kompostu může být metodickým návodem pro další provozovatele kořenových čistíren, kteří by chtěli využít možnosti kompostování čistírenských kalů.

Na stejném kompostu probíhaly i experimentální laboratorní práce, jejichž cílem je měření vlhkosti kompostu pomocí snímačů půdní vlhkosti Virrib (výrobce Amet) za účelem jejich kalibrace pro následné použití v provozních podmínkách na KČOV Dražovice. Hlavním cílem kalibrace je sestavit závislost mezi objemovou vlhkostí, kterou půdní snímače Virrib měří, a hmotnostní vlhkostí, která bude určena na základě měření a výpočtu dle standardní laboratorní gravimetrické metody.

Výsledkem závislosti těchto dvou popsanych veličin by pak měl být graf, který by měl sloužit k rychlému určení vlhkosti hmotnostní v % na základě výstupů objemové vlhkosti z půdních čidel. Druhým významným hlediskem je kalibrace půdních čidel na základě standardního laboratorního měření vlhkosti. Výrobce půdních čidel Virrib udává, s jakou chybou mohou snímače měřit. Na základě sestavení závislosti mezi experimentálním měřením půdních čidel a laboratorním gravimetrickým měřením bude zohledněna i chyba měření čidel. Protože k jednomu registrátoru – dataloggeru jsou připojeny čtyři půdní snímače, předpokládáme, že každý snímač může mít jinou citlivost, a proto bude provedeno měření a následné vytvoření grafu závislosti obou veličin pro každý snímač zvlášť. Současně bude sestavena závislost objemové hmotnosti na objemové vlhkosti, protože předpokládáme růst objemové vlhkosti s rostoucí ulehlostí resp. objemovou hmotností.

3 PROBLEMATIKA KOMPOSTŮ

Čistírenské kaly jsou produktem, vznikajícím v procesu čištění odpadních vod všech technologických druhů, ať už se jedná o biologickou čistírnu odpadních vod, kořenovou čistírnu odpadních vod, u nejmenších producentů septik či jímku, biodiskový typ čistíren, skrápěné filtry s přírodním nebo umělým materiálem apod. Jelikož samotná likvidace kalů na čistírně je chápána jako nakládání s odpady, přičemž musí každý producent vynaložit provozní náklady s likvidací tohoto odpadu spojené, jeví se jako velice výhodnou alternativou myšlenka založená na tezi: udělejme z odpadu produkt.

Malí producenti odpadních vod, do nichž lze řadit jak domovní čistírny do 50 EO, tak obce, až do 2000 EO, nemají ve většině případů realizovanou technologickou linku řešící kalové hospodářství. Kal bývá nejčastěji vyvážen na čistírnu odpadních vod, popřípadě je s ním naloženo jiným vhodným způsobem. Přitom jednou z nejlevnějších možností je zároveň jedna z nejjednodušších přirozených metod – založení kompostu, tedy přeměna odpadu za využití přirozených chemických, biochemických a biologických metod na anorganický výživný substrát, který je možné dále využít např. jako hnojivo.

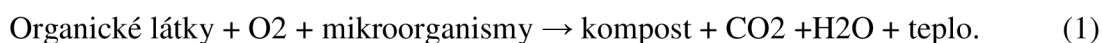
Při uvažování čistírny odpadních vod, založené na přírodních způsobech (kořenová čistírna odpadních vod, soustava stabilizačních nádrží, zemní filtry apod.), lze s výhodou využít vyprodukované biomasy mokřadních rostlin jako produktu pro kompostovací technologii a přeměnit tak odpad na produkt. Kombinace odumřelých částí mokřadních rostlin v kombinaci s čistírenským kalem se jeví jako řešení, které je předurčené pro vytvoření ideálních podmínek k založení kompostu.

3.1 KOMPOSTY A KOMPOSTOVÁNÍ

Kompostování je přirozená biochemická přeměna, kdy za aerobních podmínek dochází k rozkladu organických látek a jejich přeměně na látky humusové. Výsledkem kompostování je především převedení nestabilních organických surovin na stabilní produkt, což doprovází snížení objemu a hmotnosti, snížení obsahu vody a potlačení nežádoucích druhů mikroorganismů (Plíva a kol., 2005). Při kompostování se přeměňuje za působení mikroorganismů surový materiál na humus a jeho složky (Šťastný, 1991).

Přeměna organických látek při kompostování, probíhá stejným způsobem jako v půdě a lze ji technologicky ovládat. Proto lze kompostování definovat jako řízený proces, který zabezpečuje optimální podmínky potřebné pro rozvoj žádoucích mikroorganismů a lze získat humusové látky rychleji a produktivněji proti polním podmínkám (Kompostování, 2010 [online]).

Proces kompostování můžeme popsat zjednodušenou obecnou rovnicí (1), kterou uvádí Plíva a kol. (2005). Dle této rovnice jsou vstupními hodnotami do procesu kompostování organické látky, vzduch a mikroorganismy. Vzájemnou interakcí těchto složek se uvolňuje teplo a oxid uhličitý, dochází ke snížení obsahu vody a jako výsledný produkt celého procesu kompostování vznikne kompost.



Konečným produktem kompostování je tedy kompost. Lze ho definovat jako stabilizovanou nepáchnoucí, hnědou až černou homogenní hmotu, drobtovité až hrudkovité struktury, která vzniká aerobním biologickým zráním rozložitelných odpadů. Kompost je bohatý na humusové látky a rostlinné živiny (Plíva a spol., 2005). Surovinová skladba čerstvého kompostu je dána hmotnostním poměrem jednotlivých odpadů nebo hmot, které navážíme do kompostové zakládky (Votoupal, 2009).

Požadavky na kompost upravuje vyhláška č. 341/2008 Sb., podle které musí být dodrženy tyto parametry: vlhkost 40-65 %, acidobazická reakce 6,0-8,5, spalitelné látky v sušině vzorku min 25 % hm., celkový dusík jako N přepočtený na vysušený vzorek min. 0,6 % hmotnosti, poměr C:N min. 20, max. 30, nerozložitelné příměsi max. 2,0 % hmotnosti. Současně definuje limitní koncentrace vybraných rizikových látek a prvků. Vyhláška popisuje i požadavky na kompostárny, četnost a druh kontrol kompostu a další potřebná měření a opatření spojená s nakládáním s biologicky rozložitelnými odpady (Vyhláška č. 341/2008 Sb.).

3.1.1 Kompostování čistírenských kalů

Kompostování čistírenských kalů je jedna z možných metod finálního zpracování kalů. Mimo jiné lze kaly likvidovat například pomocí spalování, ať už mokrého nebo v cementárenských

pecích, chemické stabilizace a následně na aplikace zemědělskou půdu, termického zpracování nebo skládkování (Dohányos, 2006). Kompostování se jeví jako ekologicky nejvhodnější forma finálního zpracování čistírenských kalů, jelikož nevyžaduje, ve srovnání s ostatními jmenovanými, přínos externí energie ani chemikálií.

Jako zdroj organických látek a vstupní surovinu do procesu kompostování je možné využít i čistírenské kaly. Vyhláška č. 341/2008 Sb. přiděluje čistírenským kalům, jako biologicky rozložitelnému odpadu označení 1 02 02 04 - Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku.

Společným problémem při kompostování je tekutá konzistence kalů. Poměr C:N je ovlivněn charakterem kalů a běžně u čistírenských kalů dosahuje hodnot (6-16):1. Mezi další důležité charakteristiky čistírenských kalů, patří vlhkost, která se u kompostovaných kalů pohybuje od 55-95 %, obsah sušiny N v rozmezí 2,2-4,0 % či obsah sušiny P₂O₅ 0,6 - 1,3 % (Plíva a kol., 2005). Tyto hodnoty můžeme srovnat s jinými surovinami využívanými pro kompostování, jako je například chlévská mrva nebo kejda. Podle tabulky těchto hodnot Tab. 1 kterou uvádí Plíva a kol. (2005), lze konstatovat, že čistírenský kal se od výše zmiňovaných surovin významně liší jen v obsahu sušiny uhlíku. Ostatní parametry jsou v daném rozmezí podobné.

Tab. 1: Hodnoty vlhkosti (%), obsahu organické hmoty a živin (% sušiny) v surovinách vhodných do kompostu (Plíva a kol. 2005)

Surovina	Vlhkost (%)	C (% sušiny)	N (% sušiny)	P ₂ O ₅ (% sušiny)	K ₂ O (% sušiny)	CaO (% sušiny)	MgO (% sušiny)
Chlév. mrva skot	75-82	39-43	1,8-2,4	1,1-1,4	2,5-2,9	2,0-2,4	0,4-0,7
Chlév. mrva koně	68-73	43-46	1,9-2,5	1,0-1,3	1,9-2,3	1,1-1,3	0,2-0,5
Chlév. mrva ovce	65-70	44-48	2,5-3,0	0,7-1,0	2,0-2,3	0,8-1,1	0,1-0,4
Kejda prasat	91-98	36-39	5,0 5,8	3,5-4,2	2,9-3,4	3,1-3,8	0,7-1,3
Kejda skotu	94-99	35-41	3,5-4,5	1,6-2,0	3,2-3,9	2,0-5,0	0,5-0,8
Čistírenský kal	55-96	13-23	2,0-4,5	0,6-1,3	0,3-0,8	2,5-10,0	0,4-1,0

Ke kompostování jsou vhodné zejména ty kaly, které jsou stabilizované, mají vysoký podíl organických látek a minerálních složek. Tyto kaly není účelné zneškodňovat nebo využívat samostatně. Zpracování kalů kompostováním předpokládá mít k dispozici poznatky o jejich skladbě a kvalitě z hlediska fyzikálního, chemického a biologického (Plíva a kol., 2005). Vhodnost čistírenských kalů pro zpracování na kompost závisí na charakteru odpadní vody, na procesu úpravy odpadní vody, na chemikáliích použitých pro flokulaci a na zdroji kalu (průmyslový nebo z domácnosti) (Šťastný, 1991). Podle tabulky vlastností surovin vhodných do kompostu, kterou uvádí Plíva a kol. (2005), mají kanalizační kaly vlhkost v rozmezí 55-96 %, obsah sušiny organické hmoty: C 13-23 %, N 2,0-4,5 %, P_2O_5 0,6-1,3 % a K_2O 0,3-0,8 %, obsah živin je pro CaO 2,5-10,0 a pro MgO 0,4-1,0.

Kompostování čistírenských kalů a jejich mikrobiální přeměna probíhá s použitím různých druhů nakypřujících materiálů jako např. dřevěných štěpků, kůry, listí pevných odpadů atd., aby se kal stal prostupným pro vzduch (Šťastný, 1991). V případě kořenových čistíren odpadních vod se jako nakypřující materiál jeví vhodné použití biologického substrátu z odumřelých mokřadních rostlin, které jsou osázené na kořenových polích. Kompost vzniklý kompostováním čistírenských kalů by měl být po skončení procesu kompostování stabilní a hygienizovaný organický substrát bez přítomnosti vodorozpustných forem dusíku. Mimo základní makroprvky N, P a K by měl obsahovat i dostatek Ca, Mg a mikroprvky. Úroveň pH by měla být vždy neutrální, spíše však zásaditého charakteru, a to v rozmezí od 6 do 8,5 (Votoupal, 2009).

3.2 ZÁKLADNÍ FÁZE KOMPOSTOVÁNÍ

Proces kompostování lze rozdělit do tří základních fází. Jednotlivé fáze se od sebe liší různým průběhem teplot a chemickými reakcemi, které v kompostu probíhají. Různá je také délka trvání dané fáze. Jednotlivé fáze rozkladu, přeměny a dozrávání jsou popsány v následujících podkapitolách.

3.2.1 I. fáze - rozkladu

Základními chemicko-biologickými procesy při fázi rozkladu jsou procesy mineralizace a nitrifikace. Tato fáze je specifická rychlým nárůstem teploty (v jádru kompostované hmoty dosáhne hodnot až přes 70 °C), následované jejím relativně rychlým poklesem. Hlavní roli

v procesu rozkladu mají termofilní organismy, které se podílejí na rozkladu složitých organických sloučenin na sloučeniny jednodušší anorganického charakteru.

Během této fáze klesá objem hmoty, především vlivem bilančního poklesu celkové hmotnosti z produkce oxidu uhličitého a jiných plyných zplodin, současně dochází ke zhutňování hmoty. (Kompostování, 2010 [online]). Vzhled kompostu se zatím příliš nemění, pach zůstává stejný jako na počátku. Kompost zatím nemá vlastnosti humusu a není schopný aplikace do půdy, především vlivem nízkého pH (Votoupal, 2009). Pokles pH je následek přebytku kyselin, které nejsou organismy přeměňovány. (Kompostování, 2010 [online]) Někdy může v této fázi vykazovat i určité známky fytoxicity. Důležité je, že v této fázi dochází k hygienizaci kompostu. Teplota hubí hnilobné a patogenní bakterie, ale likviduje i klíčivost semen (Votoupal, 2009).

3.2.2 II. fáze - přeměnná

Přeměnná fáze se vyznačuje pozvolným poklesem teploty ze 40 °C na 25 °C. Termofilní bakterie nahradí jiná skupina mikroorganismů a plísní či nižší formou hmyzu. V této fázi se střídají období rozvoje a útlumu mikrobiální činnosti. Postupně pokračuje a dozrívá fáze mineralizace. Při rozkladu hůře přístupných složek nastupují aktinomycety. Organické látky jsou postupně přeměňovány na humusové složky. Ty se váží na jílovité částice a přechází na stabilní formy odolné mikrobiálnímu rozkladu (Votoupal, 2009). Mění se původní struktura, pach a vzhled. Kompost dostává hnědou barvu, jednotlivé částice se rozpadají. Hmotnost se snižuje o 10 %. Prakticky nelze rozeznat původ skladby kompostu. Mizí fytoxicita a výluhy kompostu jsou hygienicky nezávadné. Ke konci druhé části již lze kompost použít jako hnojivo (Kompostování, 2010 [online]).

3.2.3 III. fáze - dozrávání

Nastává vyrovnání teploty na hodnotu okolí. Postupně dochází k vytvoření vazeb mezi anorganickými a organickými látkami a k tvorbě kvalitního a stabilního humusu. Není pozorován téměř žádný úbytek hmotnosti. Kompost už je prakticky vyzrálý, objevují se kokovité bakterie jako představitelé autochtonní mikroflóry, malí živočichové, hmyz, roztoči, sviňky, stonožky, žížaly a další organismy. Celkové snížení hmotnosti od začátku kompostování může dosáhnout až 40 %.

Po správném průběhu všech fází kompostování by měl výsledný kompost splňovat parametry tak, jak je popisuje vyhláška č. 341/2008 Sb.; viz kapitola 3.1 Komposty a kompostování.

3.3 PROCESY PROBÍHAJÍCÍ V KOMPOSTECH

V procesu kompostování, resp. během jednotlivých fází, probíhá řada chemických a biochemických reakcí, díky kterým se vstupní suroviny postupně přeměňují na vyzrálý kompost. V případě, že je na kompost aplikován čistírenský kal z usazovací nádrže (stabilizovaný kal), lze předpokládat při vystavení vzdušnému prostředí odbourání přítomného amoniakálního dusíku procesem nitrifikace. Organická hmota, přítomná v kompostu, je v kombinaci s přítomnými mikroorganismy předpokladem k procesu přirozené mineralizace.

3.3.1 Mineralizace

Je biologicko-chemickým dějem, který probíhá při vysokých teplotách kolem až kolem 70 °C. Mikroorganismy rozkládají složité organické sloučeniny na jednodušší anorganického charakteru. Probíhají rovněž chemické degradační reakce. Konečným produktem těchto rozkladů jsou voda, CO₂ a nitrátový iont NO₃⁻. Při přebytku dusíku ve směsi může vznikat amoniak. Mikroorganismy nejsou schopné odbourávat organické kyseliny, proto rychle roste relativní zastoupení těchto kyselin a dochází k okyselení zakládky (Votoupal, 2009).

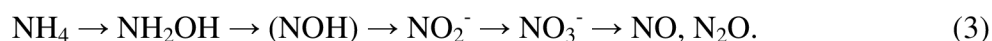
3.3.2 Nitrifikace

Nitrifikací se nejčastěji rozumí biologická oxidace amoniaku na nitrit a nitrát. Obecnější definice popisuje nitrifikaci jako biologickou přeměnu amoniaku a organických sloučenin dusíku z redukováných forem na oxidovanější. Nitrifikace je klíčovým procesem, neboť přeměňuje málo pohyblivou formu dusíku (NH₄⁺) na formu velmi pohyblivou (NO₃⁻):



Tímto se dusík zpřístupňuje jako dobře využitelná živina a zároveň se vytvářejí předpoklady pro jeho vyplavování a denitrifikaci. Nitrifikace spotřebovává kyslík a okyseluje se při ní

půdní prostředí, neboť vznikají protony H^+ . Úplnější zápis sekvence nitrifikačních reakcí zahrnuje i meziproducty – hydroxylamin (NH_2OH) a další sloučeniny:



V průběhu nitrifikace tedy může vznikat i oxid dusnatý (NO) a oxid dusný (N_2O). Většina nitrifikační aktivity připadá na autotrofní nitrifikátory (chemolitoautotrofní bakterie). Za určitých podmínek může nabýt na významu nitrifikace heterotrofní, tedy produkce nitritů nebo nitrátů neautotrofními mikroorganismy. Heterotrofní nitrifikátoři patří taxonomicky mezi bakterie a mikromycety. Běžný poměr produktů (NO_3^- / N_2O) je při nitrifikaci sice větší než 100, čili na N_2O připadá méně než 1 % dusíku, ale při velkém množství nitrifikovaného dusíku se může tvořit poměrně dost N_2O a NO .

První krok nitrifikace, tedy oxidace amoniaku na nitrit, spotřebovává mnoho kyslíku. Při poklesu koncentrace O_2 pod určitou mez je pro normální průběh oxidačních reakcí kyslíku nedostatek a nitrifikační bakterie začnou jako konečný akceptor elektronů využívat vlastní produkt – nitrit –, nebo dokonce nitrát či nitrit z okolního prostředí. Právě při těchto procesech vzniká mnohem více plynných dusíkatých sloučenin (N_2O a také značný podíl NO) (Šimek, 2009).

Proces nitrifikace by při správně navrženém kompostu měl proběhnout jako jeden z prvních biochemických procesů – vlivem aerobních podmínek a snadno dostupnému kyslíku pro rozklad přítomného amoniakálního dusíku, který je obsažen v čistírenském kalu.

3.3.3 Metanizace

I přes to, že by ve správně navrženém kompostu nemělo docházet k metanizaci, protože tento biologicko-chemický děj je při správném průběhu kompostu nežádoucí, je důležité zmínit jeho podstatu už jen z toho důvodu, že dalším způsobem zpracování čistírenských kalů na čistírnách odpadních vod je právě anaerobní stabilizace, čili metalizace.

Metanizaci lze stručně popsat jako anaerobní fermentaci organických materiálů (Žídek, 2004). Pokud tuto myšlenku rozebereme, je metalizace souborem několika na sebe navazujících procesů, při kterých směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Na tomto rozkladu se podílí několik skupin anaerobních mikroorganismů, kde produkt jedné skupiny se stává substrátem skupiny druhé. Konečnými produkty je vzniklá biomasa, dále pak plyny (CH_4 , CO_2 , H_2 , N_2 , H_2S)

a nerozložitelný zbytek organické hmoty, který je z hlediska hygienického a senzorického stabilizován (Žídek, 2004).

Proces metanizace je složen ze 4 základních fází: hydrolýzy, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze (Straka a kol., 2003). Zjednodušený popis fází metanizace podle Straky a kol. (2003):

Hydrolýzní fáze - anaerobní bakterie, přeměňují makromolekulární rozpuštěné i nerozpuštěné organické látky (bílkoviny, polysacharidy, tuk, celulózu) pomocí extracelulárních hydrolytických enzymů, produkovaných fermentačními bakteriemi, na nízkomolekulární látky (monosacharidy, aminokyseliny, mastné kyseliny, voda) rozpustné ve vodě.

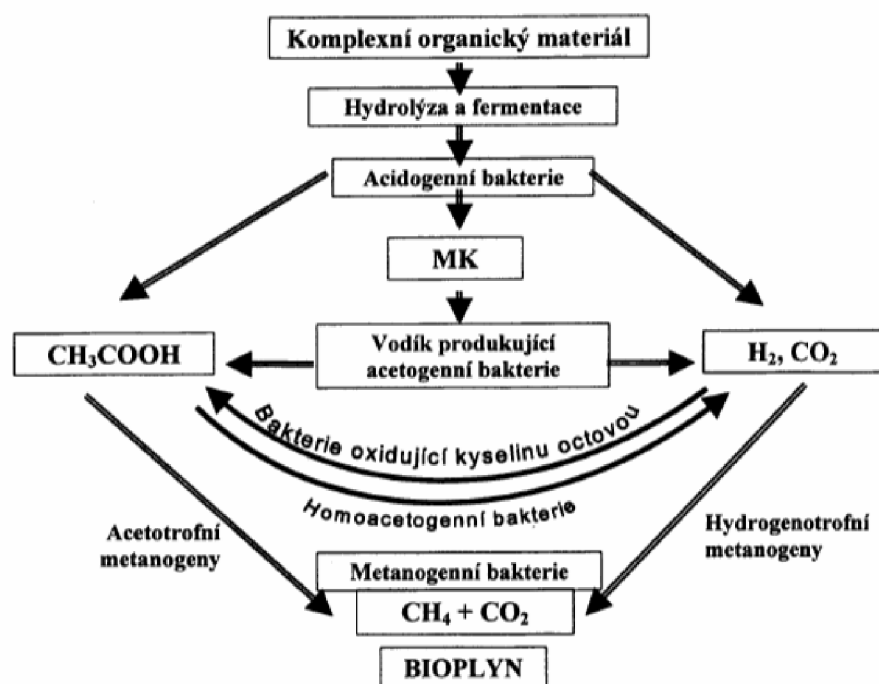
Acidogenní fáze - v této "kyselé" fázi jsou rozkládány produkty hydrolýzy na jednodušší organické látky (kyseliny, alkoholy, CO_2 , H_2). Fermentací těchto látek se tvoří řada konečných redukovaných produktů, které jsou závislé na charakteru původního substrátu a podmínkách prostředí. Při nízkém parciálním tlaku vodíku jsou produkovány kyselina octová, CO_2 a H_2 při vyšším jsou tvořeny vyšší organické kyseliny, kys.mléčná, ethanol apod.

Acetogenní fáze - probíhá oxidace produktů acidogeneze na CO_2 , H_2 a kyselinu octovou, která je také tvořena acetogenní respirací CO_2 , H_2 homoacetogenními mikroorganismy. Účast těchto mikroorganismů produkujících vodík je nezbytná, poněvadž rozkládají kyselinu propionovou a ostatní organické kyseliny vyšší než octovou, alkoholy a některé aromatické sloučeniny. Jsou zde zastoupeny i minoritní skupiny organismů (sulfátreduktanty, nitrátreduktanty) produkující vedle kyseliny octové a vodíku také sulfan a dusík.

Methanogenní fáze - je poslední fází procesu obsahující methanogenní organismy, které rozkládají některé jednoduhlíkaté látky (methanol, kyselina mravenčí, methylamin, CO_2 , H_2 , CO) a kyselinu octovou. Jsou nejdůležitější trofickou skupinou, mají specifické požadavky na substrát i životní podmínky a vedle acetogenů zpracovávajících kyselinu propionovou se často stávají limitujícím faktorem celého procesu. Podle specifiky substrátu je lze rozdělit na pouze hydrogenotrofní nebo pouze acetotrofní. Působením acetotrofních methanogenních *bakterií* vzniká více než 2/3 CH_4 v bioplynu. Rozkládají kyselinu octovou na směs metanu a CO_2 . Jsou schopny udržovat pH fermentačního média, protože odstraňují kyselinu octovou a produkují CO_2 . Ve srovnání s druhou skupinou pomaleji rostou (generační doba několik dní). Hydrogenotrofní methanogenní bakterie produkují methan z CO_2 a H_2 . Rostou poměrně

rychle, jejich generační doba je cca 6 hodin. V anaerobním procesu působí jako samoregulátor. Odstraňují z procesu vodík, jehož koncentrace by měla být při dobré činnosti organismů minimální. Vodíkem jsou nejvíce ovlivňovány acetogenní bakterie rozkládající kyselinu propionovou a máselnou. Pro tyto organismy je přítomnost hydrogenotrofních organismů životně důležitá (Straka a kol., 2003).

Pro jednodušší představu celého průběhu procesu metanizace lze využít schéma Knáпка (2004) na obrázku Obr. 1.



Obr. 1: Schéma anaerobního rozkladu (Knápek, 2004)

3.4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES KOMPOSTOVÁNÍ

Výslednou kvalitu kompostu, rychlost a správný průběh kompostování ovlivňuje řada faktorů. Mezi nejdůležitější vlastnosti, které významně ovlivňují proces kompostování a kvalitu výsledného produktu patří především teplota, vlhkost, obsah kyslíku, hodnota pH, poměr živin poměr C:N, mikrobiální aktivita. Všechny tyto fyzikální a chemické vlastnosti jsou mezi sebou úzce spjaty a nesprávné hodnoty jednoho z faktorů mohou negativně ovlivnit další.

3.4.1 Teplota

Teplota hraje hlavní roli v procesu kompostování a lze konstatovat, že je jeho funkcí. Ovlivňuje růst a aktivitu mikroorganismů a v důsledku toho určuje rychlost rozkladu organických kompostovaných materiálů (Šťastný, 1991). Je také významná pro rozklad organických látek a především k likvidaci lidských, živočišných a rostlinných patogenních mikroorganismů a parazitů (Plíva a kol., 2005).

Průběh teplot během kompostování lze rozdělit do dvou hlavních částí. První fáze se nazývá mezofilní. Mezofilní fáze je doprovázena teplotami v rozsahu 10 °C až 40 °C. Druhá fáze, termofilní, je charakterizována vyššími teplotami nad 40 °C. Po těchto dvou fázích dochází k poklesu teplot, které by se měly u zralého kompostu stabilizovat na úrovni teploty okolního prostředí. Optimální teplota pro rozklad organických látek je dána především druhem surovin, protože různé organické materiály se rozkládají při různých teplotách. Nejčastěji se pohybuje od 50 °C do 60 °C (Plíva a kol., 2005). Většina mikroorganismů v čistírenském kalu je mezofilní, to znamená, že optimální teplota pro jejich vývoj je v rozmezí od 20 °C do 30 °C. Postupně se ale stává dominantní termofilní skupina mikroorganismů, které rostou nejrychleji při teplotách 45 °C až 65 °C. Při tomto procesu se vytvářejí dostatečně vysoké teploty, aby došlo ke zničení různých druhů patogenů (Šťastný, 1991).

Průběh teploty je v procesu kompostování nutné sledovat a je možné ho i ovlivňovat. Nežádoucí změny teplot popisují autoři Váňa a Ušák (2007). Pokud například teplota kompostu nestoupá nebo po předchozím vzestupu teplot nastává výrazný pokles, jsou podmínky pro organismy nepříznivé. Nejčastěji je příčinou tohoto negativního jevu spotřeba kyslíku, kdy dojde k zahlcení substrátu oxidem uhličitým, ale může to být také důsledek nadměrné vlhkosti, omezující obsah vzduchu v kompostu. Pokles teplot nastává i při vyschnutí zrajícího substrátu nebo při nedostatku dusíku v kompostu (Váňa, Ušák, 2007). Stejně tak je, dle autorů, nežádoucí i vysoký nárůst teplot na 75 °C, protože při této teplotě již vhodné mikroorganismy hynou a prodlužuje se doba zrání kompostu. Při teplotě nad 60 °C dochází k významné redukci různých druhů mikroorganismů. Při 70 °C je celková aktivita mikroorganismů pouze 10-15 % aktivity a při 75-80 °C biologická aktivita ustává (Jeníček, 2009). Tyto nežádoucí procesy lze odstranit především dodáním kyslíku do kompostu překopáním nebo jiným způsobem aerace, které budou popsány v kapitole 3.4.3 Obsah kyslíku.

Pokud budeme předpokládat, že teplota je funkcí procesu kompostování, je možné z jejího průběhu určit dobu zralosti kompostu. Výše teploty je dána především aktivitou přítomných mikroorganismů. Trvalý pokles teplot po alespoň dvouměsíčním zrání zpravidla signalizuje zralost kompostu. V kompostu, jehož teplota neklesne na teplotu okolí, stále ještě probíhají mikrobiologické a biochemické změny. Takový kompost by neměl být používán pro jarní hnojení, protože je mírně fyto toxický a brzdí klíčení semen (Váňa, Ust'ák, 2007).

3.4.2 Vlhkost

Vlhkost je, stejně tak jako teplota, jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností, která umožňuje životní procesy mikroorganismů v kompostu. Voda je důležitá pro transport živin, umožňuje pohyb mikroorganismů a slouží jako medium pro chemické reakce. Vlhkost kompostu je závislá na mikrobiální aktivitě a biologické oxidaci materiálu. Hlavní vliv na redukci obsahu vody při kompostování má evapotranspirace. Množství vody, které se uvolní při mikrobiální aktivitě je větší, než ztráty vzniklé odpařováním (Plíva a kol., 2005).

Optimální vlhkost kompostu se podle Plívy a kol. (2005) pohybuje v rozmezí 50 % až 60 %. Jiná literatura (Jeníček, 2009) uvádí optimální obsah vody v kompostovaném kalu podle jeho druhu mezi 55-60 %. Přitom finální kompost má mít obsah vody 40-45 %. Minimální obsah vody pro dobrý a správný průběh mikrobiálních procesů je 12-25 %.

Při nadbytečné vlhkosti dochází rychle k nedostatku kyslíku v kompostu, vlivem ucpávání pórů vodou. To vede k vývoji anaerobní mikroflóry a ke zkysnutí kompostu (Váňa, Ust'ák, 2007). Navíc negativně působí i velké množství vody, které se z kompostu odpařuje, protože odvádí větší podíl energie vlivem výparného tepla. Tím se kompost ochlazuje a neprobíhá činnost termofilních organismů. Biologické procesy se pak mohou měnit na kvasné (Kompostování, 2010 [online]). Druhým problémem, který v souvislosti s vlhkostí může nastat, je nedostatečné množství vody v kompostu. Pokud dojde k poklesu vlhkosti pod hranici 40 % dochází ke zpomalování mikrobiální aktivity (Plíva a kol., 2005). Nedostatečná vlhkost pak způsobuje vývoj nevhodné mikroflóry s převahou plísní a aktinomycet (Váňa, Ust'ák, 2007).

Vlhkost kompostu úzce souvisí s množstvím dodávaného vzduchu. Pokud je kompost příliš provzdušňován je možné pozorovat velké ztráty vody. Při dodávání malého množství vzduchu se ztráty vlhkosti značně snižují a jsou téměř konstantní (Plíva a kol., 2005). Na vlhkost

kompostované zakládky má vliv i struktura kompostovacích surovin. Nejdůležitějším faktorem je jejich pórovitost. Optimální vlhkost je taková, při níž je 70 % pórovitosti čerstvého kompostu zaplněno vodou (Váňa, Ust'ák, 2007). Z toho vyplývá, že optimální vlhkost se bude lišit podle surovinového složení kompostu. Vliv na vlhkost má i zvolená technologie kompostování.

3.4.3 Obsah kyslíku

Pro správný vývoj kompostu a průběhu kompostování je dodávka vzduchu důležitá ze třech hledisek.

Nejdůležitější je přívod kyslíku za účelem vytvoření aerobního prostředí kompostu, které následně umožňuje mikrobiální aktivitu (Plíva a kol., 2005). V provzdušňujícím se čistírenském kalu je kyslík důležitý pro vývoj termofilních mikroorganismů, aby se zajistil rychlý rozklad, odstranil zápach a stabilizovaly zbylé organické frakce, které zůstávají jako kompost (Šťastný, 1991).

Druhým hlediskem, je provzdušňování kompostů za účelem snižování vlhkosti, jak bylo popsáno v kapitole 3.4.2 Vlhkost. Správný přísun vzduchu má vliv na správný vývoj zrání kompostu (Plíva a kol., 2005).

V poslední řadě je dodávka vzduchu důležitá pro regulaci teplot v průběhu kompostování.

Obsah kyslíku ve vzdušných pórech zrajícího kompostu by neměl klesnout pod 6 % (Plíva a kol., 2005). Autor Šťastný (1991) uvádí koncentraci kyslíku pro kompostování čistírenských kalů mezi 5 % až 15 %. V tomto rozmezí se dosahují takové teploty, aby se zabezpečila destrukce patogenů a rychlá stabilizace.

Zajistit dostatečný přísun vzduchu do kompostu je možné několika způsoby a většinou se liší podle zvolené výrobní technologie. Mezi nejčastěji používané metody patří pravidelné překopávání vhodným překopávačem kompostu nebo použití distribuce vzduchu pomocí ventilátoru (Plíva a kol., 2005). Zvýšenou aeraci je možno zabezpečit porézní vrstvou v podloží kompostu (sláma, kůra) v kombinaci s ventilačními průduchy zhotovenými za pomoci odřezků z kulatiny o průměru cca 10 cm (Váňa, Ust'ák, 2007).

3.4.4 Hodnota pH

Za optimální lze považovat pH v rozmezí 6,5-8, tedy blízké neutrální hodnotě (Plíva a kol., 2005). Podle Šťastného je možné čistírenské kaly kompostovat v rozmezí pH 5-10, stejně tak ale uvádí, že nejprůzračnější rozmezí pH pro rychlé aerobní kompostování kalů je od 6 do 8 z toho důvodu, že většina mikroorganismů vykazuje maximální růst a aktivitu v tomto rozpětí (Šťastný, 1991).

Během kompostování se mění hodnota pH. V počáteční fázi se vlivem tvorby organických kyselin pH pohybuje v nízkých hodnotách okolo 5. V této fázi jsou dominantní organismy houby a plísně tolerantní vůči kyselému prostředí. Poté jsou kyseliny rozkládány mikroorganismy, což je doprovázeno změnou pH směrem k neutrálním hodnotám nebo dokonce vyšším okolo 8,5. Při přechodu pH do neutrálních či mírně zásaditých hodnot se hlavní role při rozkladu organických látek přesouvá na bakterie (Plíva a kol., 2005).

3.4.5 Obsah živin a chemické složení

Pro udržení vhodných podmínek pro proces kompostování je důležité, aby byl zachován vhodný poměr mezi organickými a anorganickými látkami. Obsah lehce odbouratelných látek, jako jsou cukry a bílkoviny, v organických složkách je důležitý pro průběh humifikace. Pokud převažuje podíl anorganických látek, je proces humifikace zpomalen (Kompostování, 2010 [online]). K základním živinám, které jsou důležité pro organismy obsažené v kompostu, patří uhlík (C), dusík (N), fosfor (P) a draslík (K). Dusík, fosfor a draslík patří mezi základní živiny pro rostliny, a proto ovlivňují výslednou hodnotu kompostu. Uhlík je důležitý jako zdroj organické hmoty pro mikroorganismy a spolu s dusíkem umožňuje syntetizovat proteiny a podílí se na stavbě buněk a jejich reprodukci. Fosfor s draslíkem hrají důležitou roli při látkové výměně a při rozmnožování buněk (Plíva a kol., 2005).

Pro mikroorganismy je důležité i určité množství stopových prvků pro lepší asimilaci všech živin. Mezi tyto prvky patří především bór, vápník, kobalt, měď, železo, hořčík, mangan, molybden, selen, sodík a zinek (Plíva a kol., 2005).

Pro správný průběh kompostování jsou důležité všechny zmíněné prvky, ale největší význam lze přikládat uhlíku a dusíku, na kterých nejvíce závisí kvalita výsledného kompostu. Zvláště důležitý je pak jejich vzájemný poměr, tedy tzv. poměr C:N (Plíva a kol., 2005).

3.4.6 Poměr C:N

Poměr uhlíku a dusíku je důležitý parametr při kompostování, protože poskytuje užitečný ukazatel pravděpodobné rychlosti rozkladu organické hmoty (Šťastný, 1991).

Uhlík je důležitý ve formě, která je přístupná pro mikroorganismy, přitom nezáleží na jeho celkovém obsahu (Plíva a kol., 2005). Mikroorganismy využívají přibližně 30 dílů uhlíku na každý díl dusíku (Šťastný., 1991). Autor Plíva a kol (2005) uvádí, že během mikrobiálního růstu je potřeba 20 až 30 jednotek uhlíku na jednotku dusíku. Dále autor popisuje, že mikroorganismy získávají z rozložených rostlinných a živočišných zbytků obsažených v kompostu, ten pak slouží pro buněčnou stavbu.

Dusík potřebují mikroorganismy k syntéze bílkovin.

V průběhu zrání kompostu ubývá část uhlíku ve formě oxidu uhličitého a poměr C:N se zužuje. Malý poměr C:N u kompostovaných surovin vede k uvolňování dusíku ve formě amoniaku, především při zásaditém pH. Ztráty dusíku při kompostování surovin s nízkým poměrem C:N v rozmezí 9:1 až 12:1 se pohybuje mezi 37 % až 60 %. V opačném případě, pokud je poměr C:N široký - nad 50:1, jsou látky rozkládány velmi pomalu. Pokud je poměr C:N nadměrně široký prodlužuje se tím zrání kompostu a snižují se hnojivé účinky kompostu (Plíva a kol., 2005).

Vstoupal (2009) popisuje děje v půdě při aplikaci kompostu s nevhodným poměrem C:N. V případě, že je do půdy aplikován kompost nebo jiná hmota se širokým poměrem C:N, pokračuje její rozklad v půdě k čemuž se spotřebovává půdní dusík, kterého se pak nedostává rostlinám. Při příliš úzkém poměru C:N v čerstvém kompostu (pod 20:1) převyšuje obsah dusíku metabolickou potřebu mikroorganismů, přeměňujících organické látky na látky humusové. Doba zrání kompostu se tím rovněž prodlužuje a produktivita tvorby humusových látek klesá.

K optimálnímu využití uhlíku a dusíku mikroorganismy a k rychlé přeměně na kompost tedy dochází při poměru C:N (25-30):1. Poměr C:N je u čistírenských kalů většinou menší než 15 (Šťastný., 1991) Za těchto podmínek by byl rozklad substrátu rychlý, ale docházelo by k uvolňování dusíku ve formě amoniaku.

Požadované optimalizace poměru C:N lze dosáhnout při sestavování surovinové skladby tak, že k hmotám, které mají poměr C:N široký (sláma, kůra, piliny, listí, pazdeří, papír)

přidáváme odpady s úzkým poměrem (kejda, drůbeží trus, chlěvská mrva, fekálie). Je také možné přidávat dusík v dusíkatém hnojivu (síran amonný, močovinu) nebo ve formě odpadních čpavkových vod (Vstoupal, 2009).

3.5 VÝHODY A NEVÝHODY KOMPOSTOVÁNÍ

Před uvedením samotných pro a proti kompostování čistírenských kalů je nutné si uvědomit, že kal je nevyhnutelným odpadem při čištění odpadních vod a vlivem politiky Evropské unie, která zabraňuje skládkování a ukládání kalů, je nutné tento čistírenský odpad nějakým způsobem recyklovat (Dohánoys, 2006). Z těchto důvodů lze kompostování zahrnout mezi možné způsoby zpracování čistírenských kalů, které je v mnoha případech výhodnější a efektivnější než jiné řešení jeho zpracování.

K hlavním výhodám kompostování kalů z čistíren odpadních vod patří především nízké náklady v porovnání se spalováním. Tento důvod může být podstatným právě pro malé čistírny odpadních vod. Navíc je možné při kompostování čistírenských kalů recyklovat další organický materiál. Jedná se především o suroviny s vysokým obsahem uhlíku pro upravení poměru C:N. Mezi takové suroviny patří různé rostlinné zbytky, jako je sláma, stromová kůra, listí, v případě kořenových čistíren lze s výhodou aplikovat odumřelé části mokřadních rostlin po ukončení vegetační sezony, pokos živých částí mokřadních rostlin (chrastice rákosovitá), sbírané plovoucí rostliny ze stabilizačních nádrží (okřehky), apod. Kompost, jakožto výsledný produkt kompostování, je cenný produkt. Je možné ho použít pro rekultivace půdy a zdroj mikro a makroživin příznivých pro růst rostlin. Na rozdíl od kalu se kompost může snadno skladovat, nehrozí senzorické a hygienické problémy spojené se zápachem, popřípadě výraznějším únikem kalové vody do podloží. V případě kompostování směsi čistírenského kalu se směsí částí mokřadních rostlin připadá v úvahu také možnost prodeje při splnění určitých podmínek. Při kompostování se spotřebuje jen velice málo externí energie. Se stoupajícími náklady na energii a neustále se zvyšující produkcí kalů bude kompostování stále důrazněji považováno za alternativní, velice výhodnou metodu proti likvidaci kalových odpadů na skládky, spalování, pouštění do řek (Šťastný, 1991). Navíc není nutné počítat s negativními vedlejšími účinky, jako je například zápach, protože mikrobiální rozklad oxiduje organický materiál do poměrně stabilního stavu odolného proti produkci zápachu.

Další výhodou je, že výsledný kompost po správné mineralizaci neobsahuje patogenní bakterie, protože teplo produkované během rozkladu zničí většinu patogenů.

Mezi nevýhody kompostování lze uvést potřebu kalu, který musí být odvodněný na 18-30 % sušiny z důvodu snadnější manipulace a kupení kompostu. Opomenout nelze ani potřebu dostupné plochy, na které bude kompost založen (Jeniček, 2009). Ovšem pokud bude kompostování provozováno na malých čistírnách odpadních vod, je potřebná plocha srovnatelná s plochou pro vytvoření kalové jámy, pro uložení kalu před odvozem. Jako další nevýhodu lze uvést potřebu přídavného materiálu, ale to pouze v případě, že není možnost tento materiál zajistit. Opět je nutno uvést, že jako zdroj uhlíku do kompostu lze aplikovat i travní porosty, tenké větve (do průměru 1,0 cm), v případě kořenových čistíren také odumřelé zbytky mokřadních rostlin. Mezi velké zápory oproti spalování kalů patří fakt, že proces kompostování může být potenciálním zdrojem patogenů, které nebyly zlikvidovány během špatně probíhajícího procesu kompostování, či hormonů a zbytků léků, které se v čistírenských kalích mohou vyskytovat. Tento fakt je hlavním důvodem pro sledování probíhajících fyzikálních a chemických procesů během zrání kompostu. Jedná se zejména o vlhkost, teplotu a pH.

4 METODIKA KOMPOSTOVÁNÍ

Problematika kompostování na kořenové čistírně odpadních vod je v dostupné literatuře zmiňována jako jedna z možností nakládání s čistírenským kalem. Metodika kompostování, která je v odborné literatuře autory popisovaná, je zaměřena především na budování průmyslových nebo domovních kompostů. Metodický návod, jak vystavět kompost na KČOV, ale nebyl doposud popsán. Postup budování kompostu na KČOV se významně neliší od průmyslového nebo domovního kompostování, princip zůstává stále stejný. Důležité je dodržení základních podmínek pro příznivý vznik mikroorganismů, biologických a biochemických procesů. Rozdíl je ve zdroji substrátu, který bude pro kompostování použit. Podstatná je jeho skladba a vhodné střídání jednotlivých substrátových vrstev.

4.1 METODIKA KOMPOSTOVÁNÍ NA KČOV

Pro zpracování metodického popisu výstavby a provozování kompostů na KČOV byl vybrán, sestaven a popsán reálný kompost, založený v provozních podmínkách. Jedná se o kompost nacházející se na kořenové čistírně odpadních vod v obci Dražovice v Jihomoravském kraji. Tato KČOV je navržena na 500 EO, v současné době, vlivem postupného rozšiřování obce, je napojeno 780 EO. Čistírna byla realizována v roce 1997, od té doby se ani jednou neprovádělo odstranění odumřelé biomasy rostlin. Vlivem nevhodně navrženého mechanického stupně – zejména se jedná o dešťový odlehčovač, docházelo postupem času k pomalému zanášení filtračního prostředí a zároveň k akumulaci vyplaveného primárního kalu na kořenové pole. Tímto nedostatkem došlo k uložení vrstvy zahuštěného kalu nad šterkovým materiálem až do výšky 32 cm, celkové množství kalu dosahuje objemu 35 m³ (měřeno na jednom z celkem tří polí).

Kompost byl na KČOV založen z důvodů zpracování a zlikvidování čistírenské biomasy vytěžené z filtračních polí a hygienizace výše popsaného množství zahuštěného primárního kalu.

První kompost byl založen na jaře roku 2012, kdy došlo k odtěžení prvního filtračního pole. Popis založení popisují následující kapitoly. Na podzim roku 2012, stejně tak jako při zakládání na jaře, byla provedena nivelace kompostu.. Na základě těchto dvou zaměření došlo k vizuálnímu posouzení stavu tělesa kompostu před a po procesu kompostování.

Průběh výstavby kompostu na KČOV v Dražovicích byl fotograficky dokumentován. Jednotlivé dílčí části metodického postupu budou popsány v bodech a každý dílčí krok výstavby bude doplněn fotografií.

4.1.1 Úprava podloží

Před založením samotného kompostu je nutné upravit původní terén tak, aby byl umožněn odtok uvolněné vody z tělesa kompostu. Proto je nutné vyspárování směrem k nejnižšímu místu ve sklonu cca 2 %. Kompost musí být od podloží izolován, přebytečné vody z kompostu by měly být odváděny pryč z jeho tělesa – nejlépe před usazovací nádrž, popřípadě je možné odvedení vody na začátek filtračního pole, ze kterého je substrát pro kompost vytěžen. Podložní vrstva je tvořena pískem, případně drcenou stavební sutí o velikosti zrna max. 2 mm. Vlastnosti drcené stavební suti jsou velmi podobné písku. Na této vrstvě je položena netkaná geotextilie o hustotě 300 g/m², určená k mechanické ochraně další vrstvy - izolační PVC folie tloušťky 1,0 mm. PVC fólie zajišťuje nepropustné podloží tak, aby přebytečná voda, která odtéká z tělesa kompostu, byla bezpečně odváděna zpět do procesu čištění a nedocházelo ke kontaminaci půdy.

Doporučená velikost půdorysné základny je 10 x 6 m. Větší rozměry lze uvažovat s ohledem na výšku kompostu, v tomto případě dosahovala 3 metrů, protože při velkém množství substrátu pohromadě by nemusely uvnitř tělesa kompostu probíhat všechny fáze kompostování, tak jak je žádané. Dalším faktorem, který je při zakládání kompostu limitující je plocha, kterou chceme pro kompost vymežit, protože je nutné si uvědomit, že na daném místě bude stát několik měsíců.



Obr. 2: Příprava podloží a skladba podkladních vrstev pod kompostem

4.1.2 První vrstva kompostu

Před navezením vrstvy směsi biomasy a zahuštěného kalu na filtračního pole bude první vrstva kompostu tvořena pouze uschlými rostlinami rákosu obecného, které byly sesbírány mechanizací na dotčeném filtračním poli. Toto opatření má hned několik výhod. Pro vhodný průběh kompostu je nutné dosáhnout ideálního poměru C:N, čistírenské kaly mají vysoký podíl dusíku N a rostliny rákosu naopak zastupují složku C. Další výhodou je, že nahromaděný rákos vytvoří provzdušněný „rošt“, který zabezpečí přívod potřebného vzduchu do tělesa kompostu. Dostatečná aerace je další podmínkou pro kvalitní průběh kompostování. V neposlední řadě umožní provzdušněná spodní vrstva snazší odtok vody z výše uložených vrstev. Aplikací odumřelých mokřadních rostlin současně vyčistíme filtrační pole a umožníme tím intenzivnější rozrůstání rostlin nových.



Obr. 3: První vrstva - aplikace mokřadních částí rostlin do výšky 0,5m

4.1.3 Tvorba tělesa kompostu

Na základnu z rákosu pak bude navezena vrstva odtěženého kalu z filtračního pole o mocnosti přibližně 30-50 cm. Na biomasu opět položíme vrstvu rákosu. Tento postup prokládání budeme provádět až do dokončení návozu substrátu. Kromě výhod popsaných výše je prokládání rákosem přínosné ještě z důvodu zvýšení stability tělesa kompostu. Tento způsob nebyl, pro kompostování čistírenských kalů na kořenových čistírnách odpadních vod, dosud popsán v žádné literatuře a z hlediska pozorování vývoje kompostu ho lze označit jako velmi dobrý způsob řešení. Výsledný kompost má haldový tvar o půdorysných rozměrech 6,0 x 10,0 m a výšce přibližně 3,0 m.



Obr. 4: Tvorba tělesa kompostu

4.1.4 Odvodnění

Jak už bylo uvedeno, je nutné vybudovat odvodnění tělesa kompostu, což bylo v tomto případě vyřešeno pomocí žlabu, který z nejnižšího místa zakládky odvádí vodu zpět před usazovací nádrž. Popřípadě je možné odvedení vody na začátek filtračního pole.



Obr. 5: Odtokový žlab pro odvod vody.

4.2 POPIS TĚLESA KOMPOSTU PO 7 MĚSÍCH

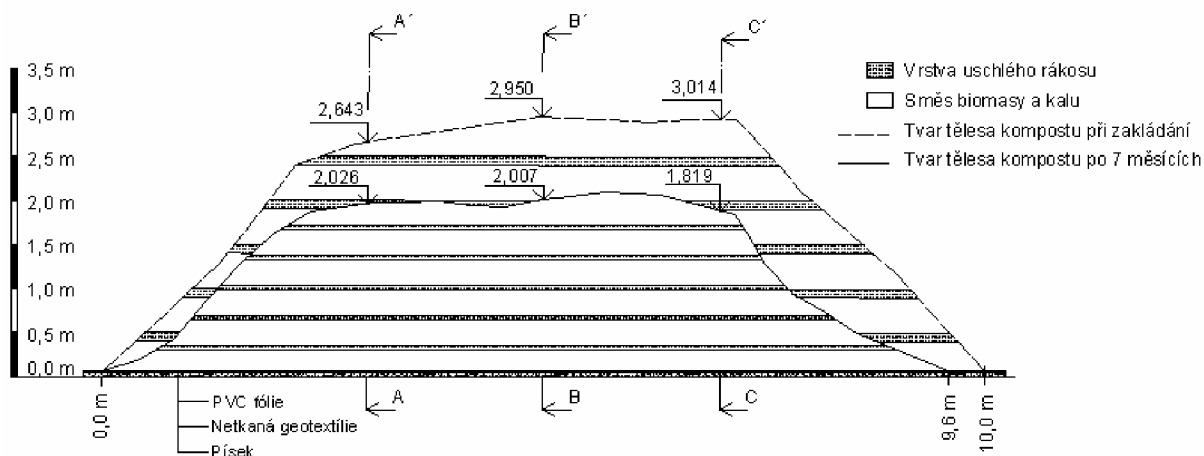
Na zájmovém kompostu bylo ihned po výstavbě provedeno výškové zaměření pomocí nivelace. Po 7 měsících, kdy byly z kompostu odebírány vzorky pro laboratorní měření vlhkosti, které je popsáno v kapitole 5 Laboratorní měření vlhkosti, proběhlo nové výškové zaměření. Současně byl stav kompostu zdokumentován.

Na obrázku Obr. 6 můžeme porovnat změnu tělesa kompostu během 7 měsíců, kdy probíhal proces kompostování. Dle vizuálního posouzení lze pozorovat pokles výšky kompostu oproti původnímu návršení. Na tělese kompostu neprobíhaly během procesu kompostování žádné úpravy ani překopávky, proto kompost porostl vegetací, což svědčí o tom, že se již jedná o substrát, na kterém proběhly jednotlivé fáze kompostování a v současném stavu je již vhodným místem pro výskyt rostlin.

Schéma řezů tělesem kompostu na obrázku Obr. 7, sestrojených na základě provedeného výškového zaměření, opět ukazují snížení výšky kompostu. Proces snížení nastal z důvodu probíhajících biologických a biochemických reakcí a vlivem postupného odvodnění oproti počátečnímu stavu. Výška kompostu klesla přibližně o 1 m, objem se zmenšil o čtvrtinu původní velikosti.



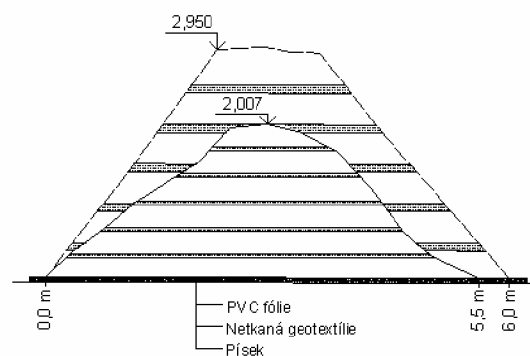
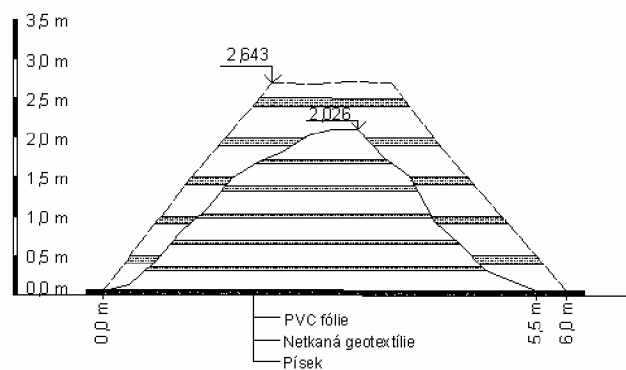
Obr. 6: Těleso kompostu po vybudování (vlevo) po 7 měsících kompostování (vpravo)



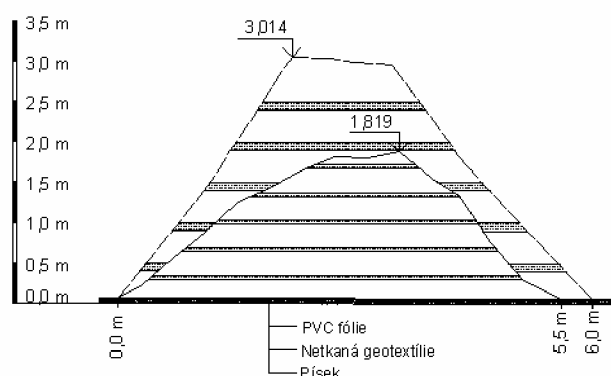
Obr. 7: Podélný řez kompostem

ŘEZ A-A' VE VZDÁLENOSTI 3 m

ŘEZ B-B' VE VZDÁLENOSTI 5 m



ŘEZ C-C' VE VZDÁLENOSTI 7 m



- Vrstva uschlého rákosu
- Směs biomasy a kalu
- Tvar tělesa kompostu při zakládání
- Tvar tělesa kompostu po 7 měsících

Obr. 8: Příčné řezy kompostem

5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ VLHKOSTI

Výzkum problematiky kompostování organických odpadů je zaměřen na měření, vyhodnocení a sestavení metodiky měření vlhkosti na kompostu z čistírenských kalů na kořenových čistírnách odpadních vod. Pro měření a výzkum byl vybrán již zmíněný konkrétní kompost na kořenové čistírně odpadních vod v Dražovicích, z něhož byly odebrány vzorky pro laboratorní měření vlhkosti kompostu. Celý postup měření bude popsán v následujících kapitolách.

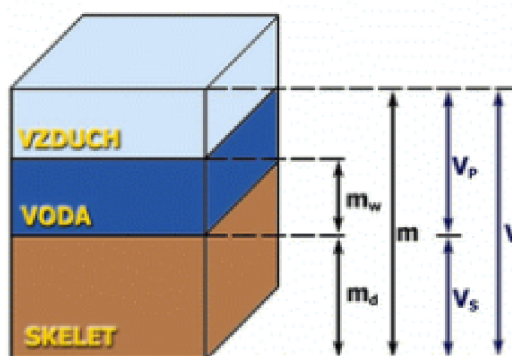
Cílem výzkumu je zkalibrovat přenosné vlhkoměry, které by měly být využity v provozních podmínkách kořenové čistírny odpadních vod a na základě nepřetržitého sledování vývoje vlhkosti v kompostu by k nim měla být instalována zavlažovací jednotka pro správnou regulaci vlhkosti v kompostu.

Jako přínos, z pohledu provozovatele, potom předpokládáme intenzivnější proces kompostování, který se může přímo promítnout do provozních nákladů spojených s plošnou náročností kompostovací jednotky.

5.1 VLHKOST KOMPOSTU

Vlhkostí zeminy resp. kompostu rozumíme množství vody, které toto prostředí obsahuje, a která se dá ze zeminy resp. kompostu odstranit vysoušením při teplotě 105 ± 5 °C do stálé hmotnosti (Weiglová, 2007).

Laboratorní měření je založeno na kalibraci dvou druhů vlhkosti: vlhkostí objemovou, kterou měří vlhkostní půdní snímače, a vlhkostí hmotnostní, v praxi standardně používanou pro vyjádření obsahu vody v zeminách nebo jiných podobných substrátech, jako je například kompost.



Obr. 9: Trojfázový systém zeminy (Weiglová, 2007)

5.1.1 Hmotnostní vlhkost

Hmotnostní, někdy uváděna jako váhová, vlhkost w je definována jako poměr hmotnosti vody v zemině k hmotnosti vysušené zeminy. Nejčastěji se vyjadřuje v procentech, kde se jako 100 % uvažuje stejný poměr hmotnosti vody a suchého základu. Její hodnota se stanoví pomocí rovnice (4):

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4)$$

m_w – hmotnost vody ve vzorku,

m_d – hmotnost vzorku zeminy po vysušení (hmotnost vzduchu v pórech se zanedbává)
(Havlová, 2004).

5.1.2 Objemová vlhkost

Je další možná veličina, která charakterizuje obsah vody v materiálu. Objemová vlhkost w_v je definována jako poměr objemu vody v zemině k celkovému objemu zeminy. Nejčastěji se vyjadřuje v procentech, kdy pro lepší orientaci je dobré uvádět, že se jedná o procenta objemová. Objemová vlhkost se stanoví dle rovnice (5):

$$w_v = \frac{V_w}{V} \cdot 100 \quad [\% \text{ obj.}], \quad (5)$$

V_w – objem vody v zemině

V – celkový objem zeminy (Havlová, 2004).

5.2 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI KOMPOSTU

Pro měření vlhkosti kompostu uvádí odborná literatura několik způsobů postupu. V zásadě je možné tyto metody měření rozdělit do tří skupin. Nejjednodušší vyhodnocení je pomocí orientační zkoušky vlhkosti. Standardní a doporučované laboratorní stanovení vlhkosti pomocí gravimetrické metoda a pro okamžité vyhodnocení je ideální měření pomocí přenosného vlhkoměru.

5.2.1 Laboratorní - gravimetrická metoda

Tato metoda se používá jako standardní pro určování vlhkosti materiálu v laboratoři a je využívána pro kalibraci vlhkoměrů, které pracují na různých fyzikálních principech (Plíva, Jelínek, 2002). Jedná se o přímé měření, kdy podstatou metody je oddělení vody od pevné fáze. Výsledná vlhkost je pak stanovena z rozdílu počáteční hmotnosti vlhkého vzorku a výsledné hmotnosti vzorku po jeho úplném vysušení (Plíva a kol., 2005).

Postup zkoušky je následující: Do předem odvážené misky (m_1) se vloží vzorek kompostu. Vzorek kompostu v misce se zváží (m_2). Miska se vzorkem se vloží do sušárny, jejíž termostat je nastaven na 105 °C a vysouší se do ustálení hmotnosti. Po vysušení se vloží miska se vzorkem do exsikátoru. Po vychladnutí se miska s kompostem zváží (m_3). Výsledná vlhkost se pak stanoví dle výpočtového vztahu (6):

$$w = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

kde: m_1 – hmotnost misky

m_2 – hmotnost misky se vzorkem kompostu

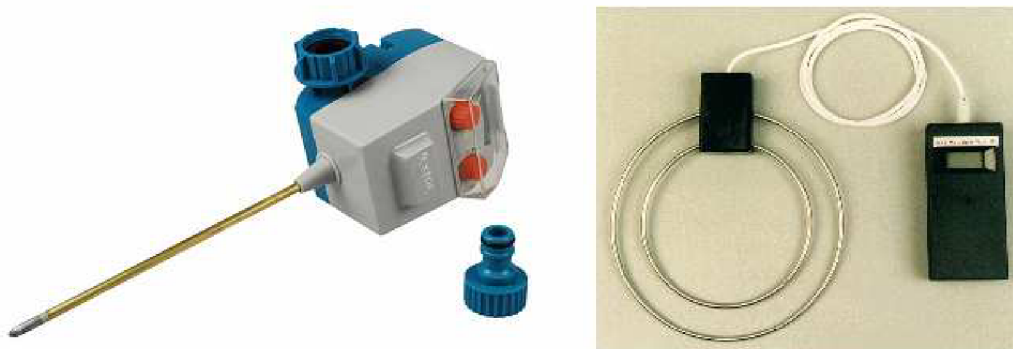
m_3 – hmotnost misky s vysušeným vzorkem kompostu

Hlavní výhodou této zkoušky je velká přesnost a velký měřicí rozsah, za nevýhodu lze považovat potřebu laboratorního zařízení – přesné váhy, sušárna, exsikátor aj. (Weiglová, 2007).

5.2.2 Přenosné provozní vlhkoměry

Pro okamžité stanovení vlhkosti kompostu „in situ“ je možné využít přenosné vlhkoměry. Ty stanovují vlhkost suroviny nepřímo, protože k jejímu určení využívají některou z celé řady fyzikálních vlastností vody, obsažené v surovinách a měřením těchto vlastností (např. vodivost, kapacita) pak usuzují obsah vody v daných surovinách (Plíva a kol., 2005).

Na trhu se nachází celá řada přenosných vlhkoměrů, pomocí kterých je možné snímat nebo zaznamenávat vlhkost kompostu. Cena terénních půdních vlhkoměrů se na českém trhu pohybuje od 200-10 000 Kč. Nejlevnějšími variantami jsou pouze čidla a sondy, které vyhodnocují okamžitý stav vlhkosti půdy, zatímco dražší vlhkoměry, řádově od 1000 Kč, jsou opatřeny dataloggerem, který zaznamenává vývoj a změny vlhkosti.



Obr. 10: Vlevo: Čidlo půdní vlhkosti Extol; Vpravo: snímač půdní vlhkosti Virrib s připojením na datalogger (zdroj: www.elny.cz; www.trickle-l.com)

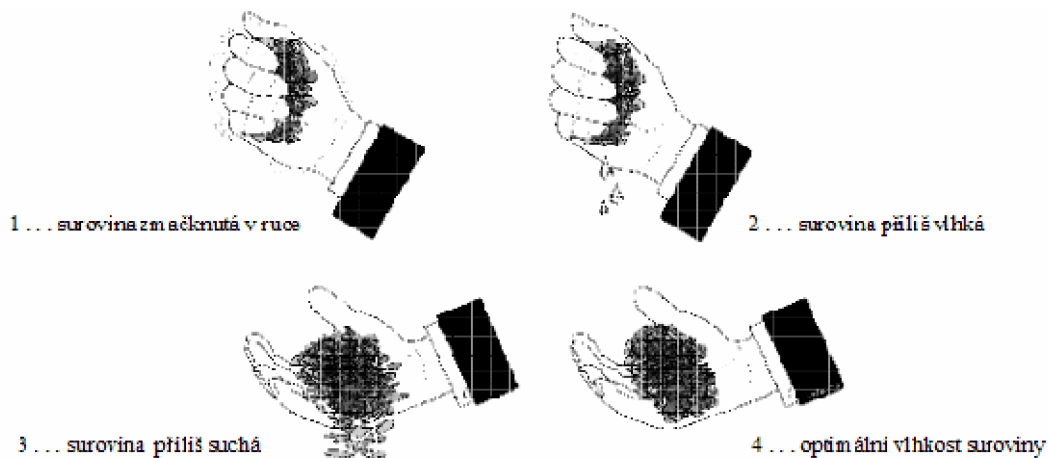
Hlavní výhodou těchto metod je okamžitá znalost výsledku, možnost nedestruktivního měření a mobilnost přístroje. K nevýhodám patří menší přesnost a nutnost časté kalibrace přístroje (Plíva a kol. 2005).

5.2.3 Orientační zkouška

Vlhkost kompostu je možné, v případě nutnosti, určit pomocí orientační zkoušky. Pro její provedení se do ruky odebere surovina kompostu a mačká se, co nejpevněji to lze.

Pokud je vlhkost kompostu optimální neobjeví se mezi prsty voda. Avšak při otevření pěsti musí surovina zůstat pohromadě ve formě „válečku“ či „knedlíku“. Pokud se surovina při

otevření rozpadne, jedná se o příliš suchý kompost. Když je kompost příliš vlhký objeví se při zmačknutí mezi prsty voda (Plíva a kol. 2005).



Obr. 11: Orientační zkouška vlhkosti (Plíva a kol. 2005)

5.3 VLASTNÍ LABORATORNÍ MĚŘENÍ

5.3.1 Odběr vzorků

Pro účel laboratorního měření byl odebrán vzorek kompostu z hloubky 0,5 m. Vzorek byl umístěn do igelitového pytle a hermeticky uzavřen, bezprostředně po převozu do laboratoře bylo zahájeno měření.



Obr. 12: Vlastní odběr vzorků

5.3.2 Místo laboratorního měření

Měření probíhalo v laboratoři ústavu vodního hospodářství krajiny VUT FAST v Brně v několika krocích tak, aby se dosáhlo požadovaných cílů uvedených v kapitole 2 Cíle. Na vzorcích dovezených z kompostu z KČOV bylo ihned zahájeno měření vlhkosti pomocí půdních vlhkostních čidel Virrib. Po dokončení měření pomocí vlhkoměrů byly připravené vzorky umístěny do sušárny pro zjištění vlhkosti gravimetrickou metodou.

5.3.3 Půdní vlhkoměry Virrib

K experimentálnímu měření vlhkosti byly použity 4 snímače půdní vlhkosti Virrib (výrobce Amet) kruhového tvaru o průměru 28 cm. Všechny čtyři snímače jsou připojeny ke společnému registrátoru (dataloggeru) Virriblogger USB, který je programovatelný pomocí programu HOBOWare Lite. Výhodou registrátoru je možnost naprogramování periody a času startu měření. Po naprogramování charakteristik měření je možné umístit měřící soupravu čidel a registrátoru do terénu, bez možnosti napojení na zdroj, protože celá souprava dokáže snímat vlhkost po dobu několika měsíců jen díky interně uložené baterii. Výhodou snímačů je jejich okamžitá odezva na změnu vlhkosti a i záznam výsledků měření v nastaveném časovém kroku po dobu několika měsíců. Lze sledovat okamžitou vlhkost substrátu, tak i vývoj teploty v procesu kompostování, která se v jednotlivých fázích mění a je potřeba dodržet její určité rozpětí. Právě z důvodů dodržení daného rozmezí vlhkosti během kompostování se nabízí využít možnosti dalšího rozšíření měřící soupravy, kterou výrobce dodává. Jedná se o připojení spínací jednotky. Ta by měla být součástí měřící soupravy poté, co bude instalována v provozních podmínkách na kompost, a měla by být připojena k čerpadlu mechanicky vyčištěné odpadní vody. Měřící soustava s připojeným spínačem by měla snímat vlhkost v kompostu. Pokud dojde k registraci minimální, předem naprogramované vlhkosti, sepne spínač čerpadlo, které během definovaného časového intervalu bude dodávat vodu, resp. závlahovou dávku kompostu. Před zahájením automatického provozu se také nastaví časový interval měření, tzn. doba, za kterou bude opět měřena objemová vlhkost. V případě, že v každém dalším měření je hodnota vlhkosti vyšší, čerpadlo nebude sepnuto.

Půdní vlhkoměry měří objemovou hmotnost na základě přestupu elektrického napětí z jedné do druhé elektrody. V závislosti na poklesu napětí vyhodnocují vlhkost v daném objemu. Čím

vyšší vlhkosti dosahuje prostředí, tím vyšší hodnota přestupu napětí je naměřena, tzn. ve vodním prostředí je pokles nulový, v úplně suchém půdním prostředí je pokles napětí 100%.

Půdní vlhkoměry Virrib od výrobce Amet byly vybrány jako nejlepší varianta s ohledem na cenovou dostupnost a technickou vybavenost celé měřicí soupravy. Právě na základě cenové dostupnosti mohou být vlhkoměry Virrib využity dalšími provozovateli KČOV, kteří by chtěli využít k likvidaci čistírenských kalů kompostování se sledováním správného průběhu zrání.

K dalším výhodám uváděným výrobcem, kromě relativně nízké ceny, patří vysoká přesnost a stálost snímačů, praktická nezávislost na druhu a typu půdy a chemickém složení, okamžitá odezva. Snímače jsou vyrobeny z koroziivzdorných.

K základním technickým parametrům výrobce uvádí rozsah měření 5-50 % obj. vlhkosti s přesností na 1 % obj., napájení 5,5-18 V. Výrobce také zmiňuje, že tyto snímače Virrib je možné po recalibraci použít k měření objemové vlhkosti u jiných substrátů než je půda, uvádí například písek, šterk, obilí apod. Na základě tohoto tvrzení mohou být snímače použity i pro měření vlhkosti kompostu. (Snímač objemové vlhkosti půdy VIRRIB [online])

Pro pracovní účely byl každý ze čtyř snímačů připojených k registrátoru Virriblogger označen písmenem: A, B, C a D. V dalším textu už budou snímače uváděny pod tímto označením



Obr. 13: Snímač objemové vlhkosti půdy Virrib – kruhová varianta (vlevo), podlouhlá (vpravo)

5.3.4 Postup měření objemové vlhkosti

Před samotným měřením vlhkosti bylo nutné stanovit objem a hmotnost plastového měřicího boxu, do kterého byl ukládán a hutněn substrát kompostu společně s vlhkosními snímači. Objem boxu byl vypočítán na základě změřených rozměrů. Ty byly určeny jako aritmetický

průměr deseti měření pomocí laserového měřiče vzdálenosti (výrobce popsaná odchylka měření 0,1 mm). Hmotnost byla změřena na závěsné váze (odchylka měření 0,01 kg). Veškerá naměřená a vypočtená data týkající se boxu jsou uvedena v tabulce Tab. 2. Objem boxu byl spočítán na základě zjištěných rozměrů podle rovnice (7):

$$V = a \cdot b \cdot c \text{ [m}^3\text{]}, \quad (7)$$

kde: a - šířka

b - délka

c - výška

Tab. 2: Údaje o plastovém boxu, ve kterém probíhalo měření

Hmotnost:

$m = 1.61 \text{ kg}$

Rozměry:

šířka [m]	délka [m]	výška [m]
0.301	0.374	0.262
0.299	0.381	0.260
0.305	0.373	0.257
0.300	0.373	0.256
0.296	0.367	0.256
0.305	0.373	0.257
0.299	0.371	0.257
0.294	0.368	0.257
0.301	0.371	0.257
0.300	0.372	0.258

Arit. průměr

Objem:

$V = 0.029 \text{ m}^3$

V dalším kroku začala samotná práce se vzorky čerstvě odebraného substrátu. Aby byla zajištěna homogenizace substrátu, byl několikrát po sobě důkladně promíchán v předem připraveném prostoru. Poté byl homogenizovaný substrát nasypán přibližně do poloviny výšky bedny. Na vrstvu substrátu byl uložen snímač půdní vlhkosti s označením A. Poté byl zasypán kompostem do zbývajících objemu měřicího boxu. Substrát přesně vyplňoval objem měřicího boxu (seřezání shora ostrohranným předmětem). Celý obsah boxu byl zvážen na závěsné váze a jeho hmotnost byla zaznamenána.

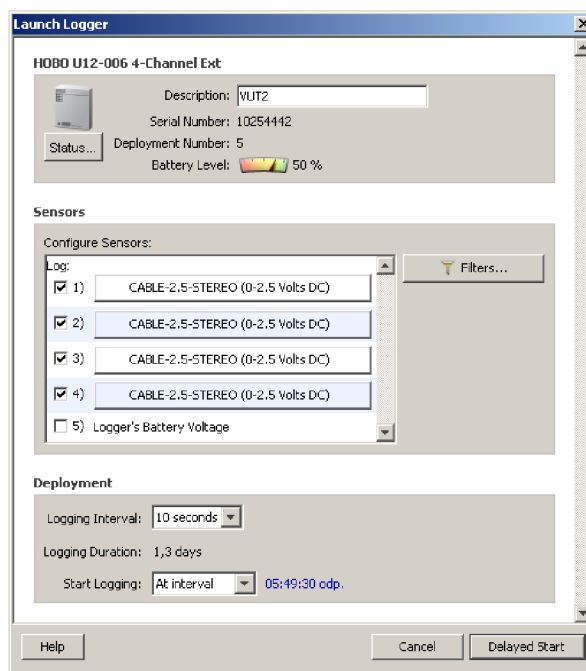


Obr. 14: Ukládán substrátu kompostu se snímačem Virrib



Obr. 15: Vážení substrátu kompostu v plastovém boxu

Po naplnění substrátu do bedny a umístění snímače bylo spuštěno měření objemové vlhkosti. V programu HOBOWare Lite proběhlo naprogramování snímačů. Časový krok měření byl nastaven na 10 s a bylo zahájeno měření, které probíhalo po dobu 2 minut a 30 s. Po ukončení měření byly výstupy opět zpracovány programem HOBOWare Lite. Výsledkem pro daný snímač byl graf průběhu vlhkosti a tabulkový záznam, který je možno převést do tabulkových procesorů, jako je například Microsoft Excel nebo Minitab 15, který byl pro účely našeho výzkumu používán.



Obr. 16: Program HOBOWare Lite při nastavení parametrů měření

Tento postup byl opakován pro všechny snímače A-D. To znamená, že po tom, co bylo ukončeno měření snímačem A, byl tento snímač vyjmut. Stejným postupem byl do substrátu umístěn snímač B. Opět bylo nutné dodržet stejnou hmotnost boxu a substrátem vyplnit celý jeho objem tak, aby bylo možné uvažovat stejnou objemovou hmotnost.

Poté, co měření proběhlo na všech snímačích, opakoval se stejný postup měření s tím rozdílem, že při plnění boxu byl substrát kompostu více hutněn. Tímto jsme dosáhli větší hmotnosti při stejném objemu, to znamená, že jsme docílili nové objemové hmotnosti. Opět se měření opakovalo pro všechny čtyři snímače.

Protože jsme potřebovali získat aspoň tři hodnoty objemové hmotnosti, abychom měli dostatečně široké spektrum hodnot pro vyhodnocení, opakovalo se celé měření při druhém, větším, zhutnění.

Celkem tedy bylo na odebraných vzorcích čerstvého kompostu provedeno 12 měření. Lze předpokládat, že se jednalo o hodnoty vlhkosti v přirozeném stavu vyzrálého kompostu.

Poté, co bylo ukončeno měření na čerstvě odebraném kompostu, byl kompost rozdělen na dvě části – jedna se ponechala volně uložená v laboratoři, kde týden vysychala, druhá byla uměle zvlhčena. Tento krok byl proveden z důvodu získání tří různých vlhkostí kompostu, opět s ohledem na požadované široké spektrum výsledků pro závěrečné vyhodnocení.

Po týdnu pokračovalo měření na těchto dvou druzích kompostu stejným způsobem, jako tomu bylo na vzorku čerstvě odebraném. Opět bylo nutné dodržet stejnou objemovou hmotnost, které se dosahovalo v předchozím měření (se substrátem v přirozeném vlhkostním stavu). Tímto postupem bylo provedeno celkem 36 měření: pro tři druhy kompostu o různých vlhkostech, při třech objemových hmotnostech pro každý ze čtyř snímačů Virrib, připojených k registrátoru Virriblogger.

Výsledkem měření bylo 36 různých objemových vlhkostí, viz tabulka Tab. 4 v kapitole 5.3.5 Výsledky měření. Měření byla vyhodnocena zvlášť pro každou sondu na základě srovnání s výsledky stanovení vlhkosti dle gravimetrické metody.

5.3.5 Výsledky měření

Hodnoty hmotnosti, na které byly jednotlivé druhy substrátu kompostu váženy z důvodu dosáhnutí stejných objemových hmotností, jsou uvedeny v tabulce Tab. 3. Výsledná objemová hmotnost byla získána na základě výpočtu, dle známých hodnot objemu plastového boxu $V = 0,029 \text{ m}^3$, viz tabulka Tab. 2, a hodnot hmotnosti kompostu, tabulka Tab. 3. Objemová hmotnost ρ se spočítá dle vzorce (8):

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (8)$$

kde: m – hmotnost kompostu

V – objem plastového boxu (Weiglová, 2007).

Tab. 3: Hmotnosti a objemové hmotnosti jednotlivých druhů kompostu

Druh kompostu	Hmotnost kompostu a plastového boxu	Hmotnost plastového boxu	Hmotnost kompostu	Objemová hmotnost kompostu
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg/m ³]
čerstvě odebraný	15,60	1,60	14,00	486,43
vysušený	19,60	1,60	18,00	625,40
zvlhčený	25,10	1,60	23,50	816,50

Jak byl uvedeno výše, proběhlo celkem 36 různých měření. V tabulce Tab. 4 je přehledně uvedený postup a každému měření je přiřazeno číslo od 1-36. Jednotlivá měření budou v následujícím textu označována právě těmito čísly.

Tab. 4: Popis jednotlivých měření a jejich číselné označení

Druh kompostu	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Označení půdního snímače	Číslo měření
Čerstvě odebraný	486,43	A	1
		B	2
		C	3
		D	4
	625,41	A	5
		B	6
		C	7
		D	8
	816,50	A	9
		B	10
		C	11
		D	12
Vysušený	486,43	A	13
		B	14
		C	15
		D	16
	625,41	A	17
		B	18
		C	19
		D	20
	816,50	A	21
		B	22
		C	23
		D	24
Zvlhčený	486,43	A	25
		B	26
		C	27
		D	28
	625,41	A	29
		B	30
		C	31
		D	32
	816,50	A	33
		B	34
		C	35
		D	36

Výsledné hodnoty objemové vlhkosti naměřené pomocí půdních snímačů Virrib jsou uvedené v tabulce Tab. 5, Tab. 6, a Tab. 8.

Tab. 5: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 1-12

čas	Číslo měření											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0:00:00	12,112	11,941	13,382	15,531	19,646	19,927	21,636	20,916	29,316	28,620	33,516	33,382
0:00:10	12,125	11,941	13,443	15,556	19,634	19,915	21,636	20,940	29,341	28,596	33,516	33,431
0:00:20	12,137	11,966	13,455	15,580	19,646	19,915	21,636	20,940	29,316	28,584	33,516	33,419
0:00:30	12,149	11,966	13,455	15,604	19,621	19,939	21,661	20,940	29,304	28,547	33,504	33,407
0:00:40	12,161	11,978	13,455	15,641	19,634	19,939	21,648	20,989	29,328	28,559	33,516	33,468
0:00:50	12,149	11,978	13,480	15,629	19,634	19,927	21,661	20,989	29,353	28,547	33,516	33,431
0:01:00	12,161	11,990	13,480	15,641	19,634	19,927	21,636	20,952	29,328	28,535	33,529	33,321
0:01:10	12,173	11,990	13,492	15,653	19,621	19,939	21,648	20,977	29,353	28,535	33,516	33,443
0:01:20	12,173	11,990	13,504	15,665	19,634	19,951	21,648	20,989	29,341	28,510	33,529	33,431
0:01:30	12,173	12,002	13,529	15,665	19,658	19,939	21,661	20,977	29,316	28,486	33,516	33,443
0:01:40	12,186	12,002	13,504	15,714	19,634	19,951	21,661	21,013	29,292	28,486	33,504	33,455
0:01:50	12,173	12,002	13,529	15,665	19,646	19,939	21,648	20,977	29,328	28,559	33,504	33,443
0:02:00	12,186	12,015	13,529	15,714	19,658	19,939	21,673	21,001	29,328	28,523	33,516	33,443
0:02:10	12,198	12,027	13,529	15,714	19,634	19,927	21,661	21,001	29,341	28,547	33,516	33,407
0:02:20	12,198	12,015	13,520	15,690	19,646	19,951	21,648	21,026	29,389	28,535	33,504	33,407
0:02:30	12,186	12,015	13,520	15,702	19,658	19,951	21,661	21,001	29,353	28,535	33,407	33,407
\bar{x}	12,165	11,989	13,488	15,648	19,640	19,936	21,651	20,977	29,333	28,544	33,508	33,421

Tab. 6: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 13-24

čas	Číslo měření											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0:00:00	7,399	7,033	7,033	9,744	9,866	9,780	13,126	12,735	15,458	16,117	16,679	18,022
0:00:10	7,399	7,057	7,057	9,695	9,902	9,792	13,077	12,735	15,433	16,129	16,691	18,022
0:00:20	7,424	7,070	7,070	9,695	9,866	9,792	13,114	12,747	15,458	16,105	16,691	18,034
0:00:30	7,436	7,082	7,082	9,719	9,902	9,792	13,138	12,747	15,458	16,117	16,691	18,059
0:00:40	7,436	7,094	7,094	9,707	9,902	9,792	13,114	12,747	15,433	16,117	16,691	17,985
0:00:50	7,411	7,094	7,094	9,731	9,902	9,805	13,150	12,759	15,421	16,081	16,703	18,022
0:01:00	7,424	7,118	7,118	9,719	9,915	9,805	13,126	12,796	15,433	16,105	16,679	18,046
0:01:10	7,460	7,106	7,106	9,744	9,902	9,805	13,126	12,784	15,433	16,105	16,703	18,010
0:01:20	7,473	7,106	7,106	9,731	9,890	9,805	13,126	12,808	15,433	16,093	16,691	18,034
0:01:30	7,460	7,118	7,118	9,731	9,915	9,817	13,138	12,747	15,446	16,068	16,667	18,010
0:01:40	7,460	7,118	7,118	9,731	9,866	9,817	13,114	12,796	15,446	16,093	16,716	18,010
0:01:50	7,460	7,131	7,131	9,744	9,866	9,829	13,126	12,747	15,458	16,105	16,691	18,010
0:02:00	7,448	7,143	7,143	9,731	9,890	9,829	13,126	12,796	15,495	16,105	16,716	18,046
0:02:10	7,460	7,143	7,143	9,731	9,866	9,829	13,138	12,796	15,470	16,142	16,716	18,022
0:02:20	7,485	7,143	7,143	9,768	9,878	9,829	13,150	12,808	15,470	16,105	16,716	17,998
0:02:30	7,485	7,155	7,155	9,756	9,890	9,829	13,114	12,821	15,470	16,142	16,691	18,034
\bar{x}	7,445	7,107	7,107	9,730	9,889	9,809	13,125	12,773	15,451	16,108	16,696	18,023

Tab. 7: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 25-36

čas	Číslo měření											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0:00:00	18,266	19,853	18,058	18,864	28,254	30,158	30,195	29,621	46,056	44,481	43,565	42,747
0:00:10	18,278	19,829	18,083	18,852	28,302	30,171	30,158	29,609	46,105	44,53	43,516	42,759
0:00:20	18,290	19,829	18,070	18,876	28,327	30,171	30,183	29,658	46,092	44,53	43,504	42,539
0:00:30	18,290	19,890	18,119	18,888	28,278	30,158	30,195	29,646	46,019	44,517	43,528	42,637
0:00:40	18,278	19,841	18,131	18,888	28,254	30,195	30,158	29,621	46,019	44,493	43,528	42,747
0:00:50	18,278	19,877	18,119	18,913	28,266	30,158	30,195	29,621	46,068	44,468	43,516	42,735
0:01:00	18,266	19,853	18,144	18,913	28,254	30,158	30,195	29,621	46,007	44,493	43,528	42,722
0:01:10	18,315	19,877	18,144	18,925	28,266	30,183	30,207	29,621	45,995	44,468	43,504	42,747
0:01:20	18,315	19,877	18,144	18,962	28,266	30,158	30,195	29,646	46,044	44,444	43,541	42,722
0:01:30	18,278	19,877	18,156	18,974	28,290	30,171	30,232	29,670	46,031	44,456	43,528	42,735
0:01:40	18,327	19,841	18,131	18,962	28,266	30,183	30,207	29,646	46,019	44,444	43,553	42,722
0:01:50	18,315	19,877	18,156	18,962	28,327	30,183	30,195	29,646	45,995	44,468	43,492	42,783
0:02:00	18,302	19,829	18,131	18,986	28,290	30,183	30,207	29,633	46,044	44,42	43,516	42,771
0:02:10	18,315	19,865	18,144	18,986	28,278	30,171	30,195	29,670	45,983	44,456	43,504	42,735
0:02:20	18,351	19,841	18,095	18,986	28,254	30,171	30,232	29,658	45,983	44,432	43,504	42,796
0:02:30	18,339	19,853	18,156	18,986	28,302	30,171	30,207	29,646	46,019	44,456	43,467	42,722
\bar{X}	18,301	19,857	18,124	18,933	28,280	30,172	30,198	29,640	46,030	44,473	43,519	42,727

Z každého měření byl vypočten aritmetický průměr \bar{X} , který byl použit pro vyhodnocení v programu Minitab 15.

5.3.6 Měření vlhkosti gravimetrickou metodou

Gravimetrické laboratorní stanovení hmotnostní vlhkosti probíhalo standardním způsobem tak, jak je popsáno v odborné literatuře. Do předem odvážené suché misky (m_1) se vloží vzorek kompostu. Miska se vzorkem kompostu se zváží (m_2), vloží se do sušárny a vysouší při 105 °C se do ustálení hmotnosti. Vysušená miska se vzorkem se po vyjmutí se sušárny umístí do exsikátoru. Po vychladnutí se miska s kompostem zváží (m_3). Výsledná vlhkost se pak stanoví dle výpočtového vztahu (9):

$$w = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

Tento postup se opakuje pro všechny tři druhy vlhkosti kompostů, kdy každý druh kompostu je reprezentován 5 vzorky, z nichž se určí aritmetický průměr.

Výsledné hodnoty jednotlivých hmotností pro daný druh kompostu a výsledné vlhkosti jsou uvedeny v tabulkách Tab. 8, Tab. 9 a Tab. 10. Pro zpracování dat v programu Minitab 15 byly opět vypočteny aritmetické průměry.

Tab. 8: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro čerstvě odebraný kompost

Označení misky	m miska	m miska + vzorek	m vzorek	m miska + sušina	m sušina	m voda	vlhkost
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
26	150,62	257,51	106,89	210,84	60,22	46,67	77.499
1A	145,08	308,88	163,8	244,53	99,45	64,35	64.706
18-4	124,33	232,44	108,11	186,77	62,44	45,67	73.142
4	173,97	435,37	261,4	340,89	166,92	94,48	56.602
3	144,86	301,23	156,37	237	92,14	64,23	69.709

Aritmetický průměr: 68,332

Tab. 9: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro suchý kompost

Označení misky	m miska	m miska + vzorek	m vzorek	m miska + sušina	m sušina	m voda	vlhkost
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
1	405,14	725,46	320,32	634,36	229,22	39,743	39.743
2	604,23	912,16	307,93	817,15	212,92	44,622	44.622
3	540,11	869,7	329,59	777,89	237,78	38,611	38.611
4	486,67	807,47	320,8	718,34	231,67	38,473	38.473
5	480,82	819,19	338,37	732,24	251,42	34,584	34.584

Aritmetický průměr: 39,207

Tab. 10: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro vlhký kompost

Označení misky	m miska	m miska + vzorek	m vzorek	m miska + sušina	m sušina	m voda	vlhkost
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
11	292,24	603,27	311,03	431,83	139,59	171,44	122.817
12	493,12	792,61	299,49	635,17	142,05	157,44	110.834
13	286,01	612,33	326,32	445,24	159,23	167,09	104.936
14	338,33	655,75	317,42	494,85	156,52	160,9	102.798
15	373,78	705,5	331,72	539,77	165,99	165,73	99.843

Aritmetický průměr: 108,246

5.3.7 Zpracování naměřených dat

Vyhodnocení výsledků probíhalo v softwarovém programu Minitab 15.

Nejprve byl v programu statisticky zhodnocen průběh měření obou hodnot vlhkosti, tedy hmotnostní i objemové. Byly určeny základní statistické parametry souborů, které jsou uvedeny na obrázcích Obr. 17 a Obr. 18. Jednalo se o tyto statistické veličiny (v závorce je vždy uveden anglický název, tak jak ho udává Minitab 15): aritmetický průměr (Mean), směrodatná odchylka (StDev), koeficient variace (CoefVar), minimální naměřená hodnota (Minimum), dolní kvantit (Q1), medián (Median), horní kvantil (Q3) a maximální naměřená hodnota (Maximum) . Pro každé měření byl také v programu Minitab zpracován statistický graf „Boxplot“, který názorně zobrazuje dané statistické veličiny, viz Přílohy.

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
čerstvě odebraný	68.33	8.06	11.79	56.60	60.65	69.71	75.32
vysušený	39.21	3.60	9.19	34.58	36.53	38.61	42.18
zvlhčený	108.25	9.09	8.39	99.84	101.32	104.94	116.83

Obr. 17: Statistická analýza hodnot hmotnostní vlhkosti při gravimetrickém měření

Výpis statistických veličin pro laboratorní měření hmotnostní vlhkosti gravimetrickou metodou na obrázku Obr. 17 ukazuje, že i přesto, že měření není příliš přesné, ve srovnání s měřením pomocí půdních snímačů, je zatíženo chybou záznamu, kterou lze považovat za limitní. Koeficient variace nepřekročil hodnotu 15 %, která je považována jako limitní, pro vyhodnocování statistických veličin. Chyby v měření, které můžeme pozorovat mimo jiné u vyšších hodnot směrodatné odchylky, je možné zdůvodnit nepřesností při práci se vzorky během měření nebo nedostatečně homogenizovanými vzorky, které byly uloženy do misek.

Na základě porovnání statistických hodnot pro měření půdními snímači na obrázku Obr. 18 lze tvrdit, že všechna měření objemové hmotnosti byla provedena s relativně malou chybou záznamu. Pokud navíc srovnáme statistickou analýzu hmotnostní vlhkosti z gravimetrického měření na obrázku Obr. 17 s hodnotami objemové vlhkosti měřené snímači na Obr. 18 může tvrdit, že se jedná o měření s velmi malou chybou. Toto dokazuje například hodnota variačního koeficientu, která je u všech měření menší než 0.5 %. Také pokud srovnáme aritmetický průměr s mediánem, vidíme, že obě hodnoty se od sebe významně neliší.

Obě měření můžeme považovat za platná.

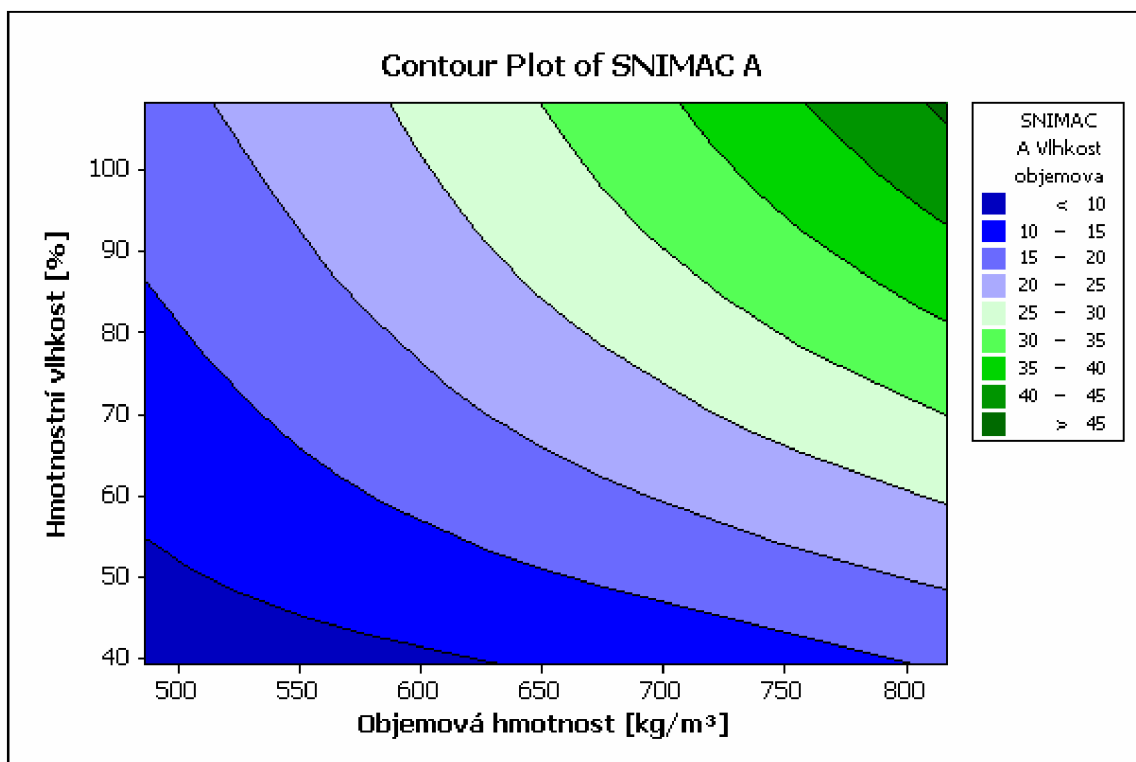
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
1 [% obj]	12.165	0.0243	0.20	12.112	12.149	12.173	12.186	12.198
2 [% obj]	11.989	0.0247	0.21	11.941	11.972	11.990	12.009	12.027
3 [% obj]	13.488	0.0401	0.30	13.382	13.455	13.492	13.524	13.529
4 [% obj]	15.648	0.0547	0.35	15.531	15.617	15.653	15.696	15.714
5 [% obj]	19.640	0.0115	0.06	19.621	19.634	19.634	19.646	19.658
6 [% obj]	19.936	0.0118	0.06	19.915	19.927	19.939	19.945	19.951
7 [% obj]	21.651	0.0110	0.05	21.636	21.642	21.648	21.661	21.673
8 [% obj]	20.977	0.0299	0.14	20.916	20.946	20.977	21.001	21.026
9 [% obj]	29.333	0.0224	0.08	29.292	29.316	29.328	29.347	29.389
10 [% obj]	28.544	0.0346	0.12	28.486	28.529	28.544	28.559	28.620
11 [% obj]	33.508	0.0272	0.08	33.407	33.504	33.516	33.516	33.529
12 [% obj]	33.421	0.0335	0.10	33.321	33.407	33.431	33.443	33.468
13 [% obj]	7.4467	0.0277	0.37	7.3992	7.4236	7.4604	7.4665	7.4848
14 [% obj]	7.1098	0.0350	0.49	7.0330	7.0879	7.1184	7.1428	7.1550
15 [% obj]	7.1098	0.0350	0.49	7.0330	7.0879	7.1184	7.1428	7.1550
16 [% obj]	9.7314	0.0202	0.21	9.6948	9.7192	9.7314	9.7436	9.7680
17 [% obj]	9.8887	0.0178	0.18	9.8656	9.8656	9.8902	9.9024	9.9146
18 [% obj]	9.8103	0.0168	0.17	9.7802	9.7924	9.8046	9.8290	9.8290
19 [% obj]	13.125	0.0170	0.13	13.077	13.114	13.126	13.138	13.150
20 [% obj]	12.775	0.0295	0.23	12.735	12.747	12.784	12.796	12.821
21 [% obj]	15.454	0.0232	0.15	15.421	15.433	15.458	15.470	15.507
22 [% obj]	16.109	0.0197	0.12	16.068	16.099	16.105	16.123	16.142
23 [% obj]	16.696	0.0144	0.09	16.667	16.691	16.691	16.709	16.716
24 [% obj]	18.024	0.0194	0.11	17.985	18.010	18.022	18.040	18.059
25 [% obj]	18.302	0.0260	0.14	18.266	18.278	18.303	18.321	18.352
26 [% obj]	19.858	0.0202	0.10	19.829	19.841	19.853	19.878	19.890
27 [% obj]	18.127	0.0320	0.18	18.059	18.107	18.132	18.150	18.168
28 [% obj]	18.937	0.0493	0.26	18.852	18.889	18.962	18.987	18.999
29 [% obj]	28.282	0.0254	0.09	28.254	28.260	28.278	28.303	28.327
30 [% obj]	30.172	0.0110	0.04	30.159	30.159	30.171	30.183	30.195
31 [% obj]	30.198	0.0195	0.06	30.159	30.195	30.195	30.208	30.232
32 [% obj]	29.642	0.0211	0.07	29.609	29.621	29.646	29.658	29.683
33 [% obj]	46.028	0.0363	0.08	45.983	45.995	46.020	46.050	46.105
34 [% obj]	44.470	0.0334	0.08	44.420	44.444	44.469	44.493	44.530
35 [% obj]	43.517	0.0239	0.05	43.468	43.504	43.516	43.529	43.565
36 [% obj]	42.729	0.0600	0.14	42.540	42.723	42.735	42.766	42.796

Obr. 18: Statistická analýza hodnot objemové vlhkosti měření 1 – 36

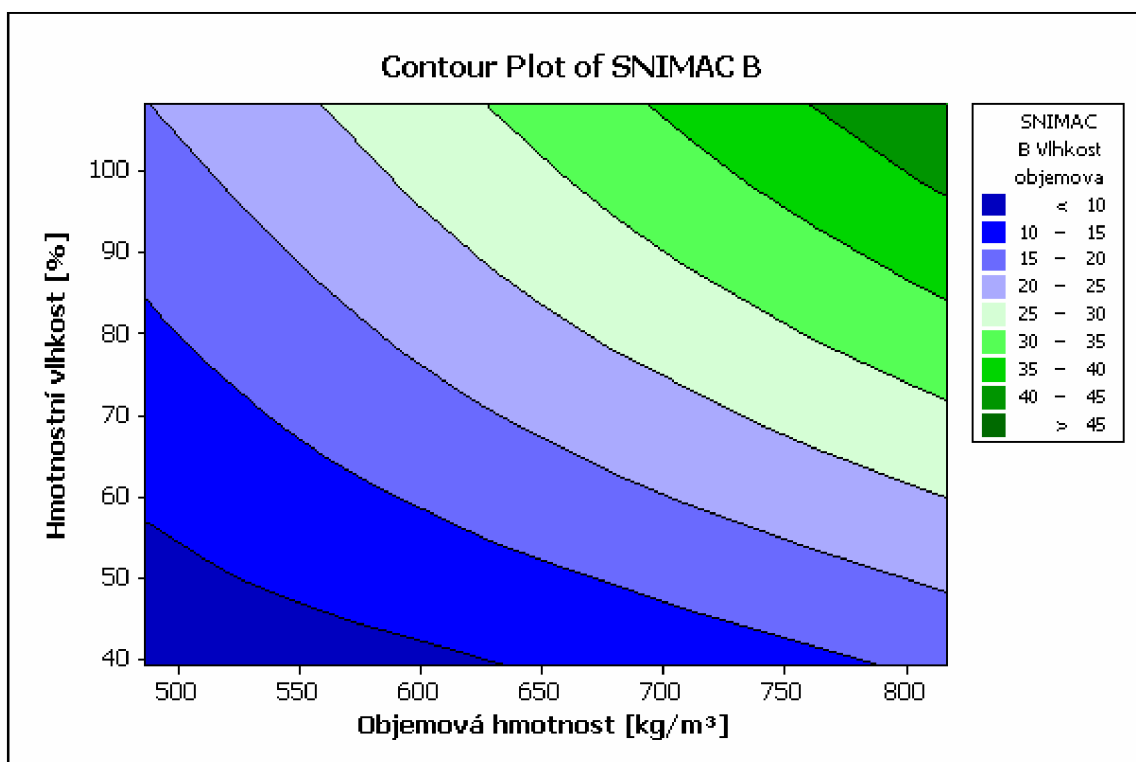
Pro vlastní vyhodnocení výsledku z měření objemové vlhkosti půdními snímači, hmotnostní vlhkosti určené gravimetrickou metodou a hodnot objemové hmotnosti, byl vytvořen graf „Contour plot“, který dokáže sestavit vzájemnou závislost těchto tří veličin.

Výsledkem je spektrální graf závislosti hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti, proveden na základě výsledných hodnot objemové vlhkosti. Každý z těchto grafů je samostatně zpracován pro každou ze čtyř sond. Výsledkem měření jsou tedy čtyři spektrální grafy pro snímač A (Obr. 19), snímač B (Obr. 20), snímač C (Obr. 20) a snímač D (Obr. 22).

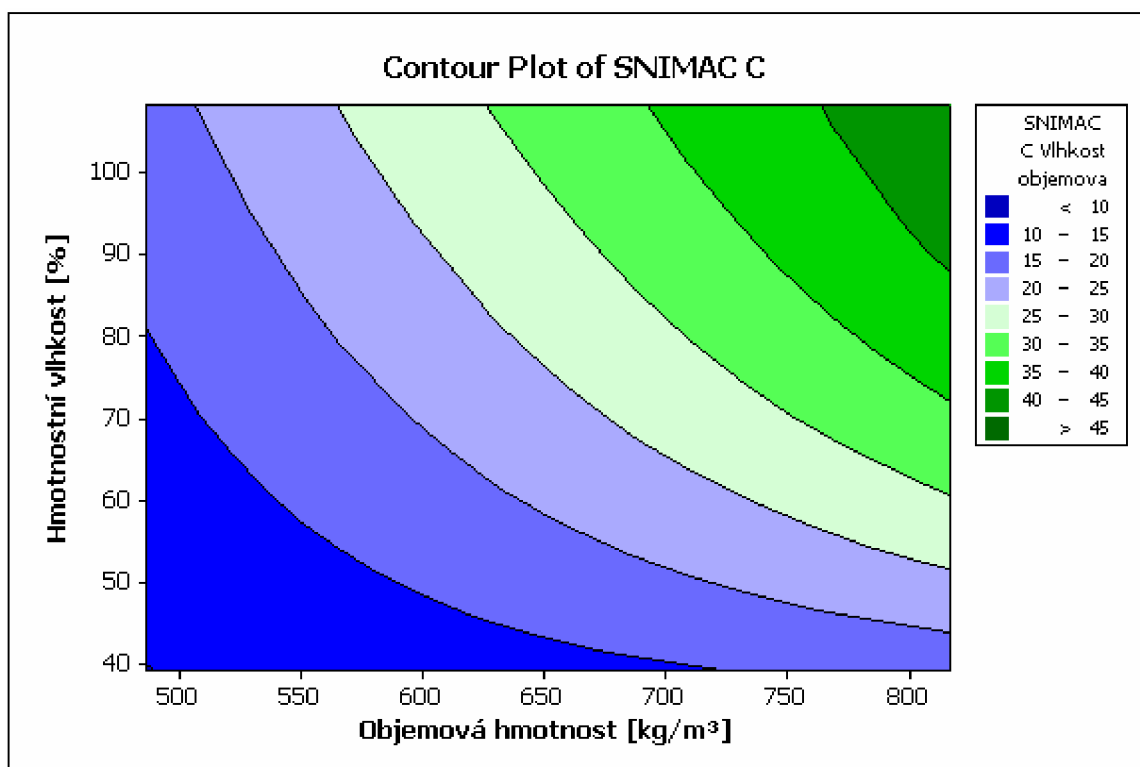
Výsledné grafy jsou kalibrací hodnot objemové vlhkosti naměřených půdními snímači na hodnoty hmotnostní vlhkosti určené na základě gravimetrického měření. Kromě kalibrace umožňují tyto grafy jednoduchou orientaci mezi oběma zmíněnými veličinami.



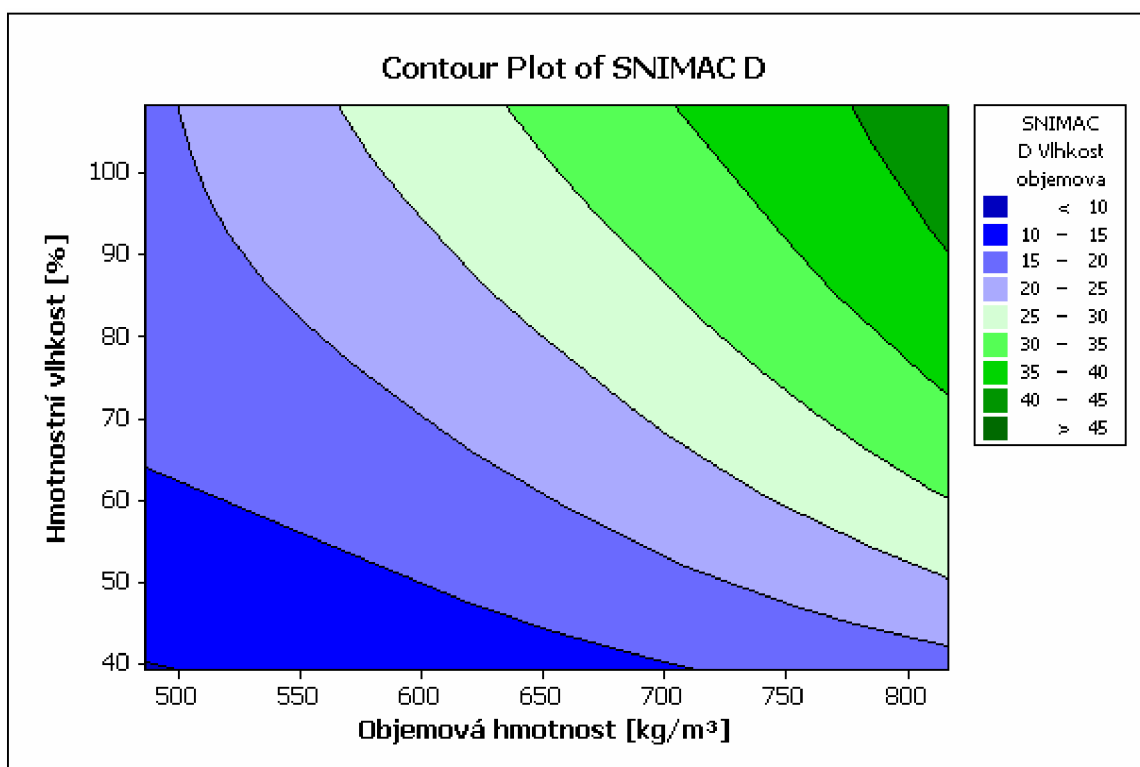
Obr. 19: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač A



Obr. 20: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač B



Obr. 21: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač C



Obr. 22: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač D

Pokud srovnáme jednotlivé spektrální grafy, lze pozorovat malé rozdíly ve výsledcích. Můžeme tedy tvrdit, že i přesto, že každý snímač měřil s chybou menší, než uvádí výrobce, jsou výsledné naměřené objemové vlhkosti u všech čtyřech snímačů rozdílné. Z tohoto důvodu je kalibrace každého snímače samostatně velmi přínosná.

Současně byla pro každý snímač sestrojena rovnice regrese, viz obrázek Obr. 23, umožňující určení hmotnostní vlhkosti na základě známé objemové hmotnosti a objemové vlhkosti, kterou udává snímač.

$$\text{Hmotnostní vlhkost SNIMAC A} = 113 + 2.96 \text{ Vlhkost objemova} - 0.159 \text{ Objemová hmotnost}$$

$$\text{Hmotnostní vlhkost SNIMAC B} = 108 + 3.07 \text{ Vlhkost objemova} - 0.156 \text{ Objemová hmotnost}$$

$$\text{Hmotnostní vlhkost SNIMAC C} = 110 + 3.27 \text{ Vlhkost objemova} - 0.172 \text{ Objemová hmotnost}$$

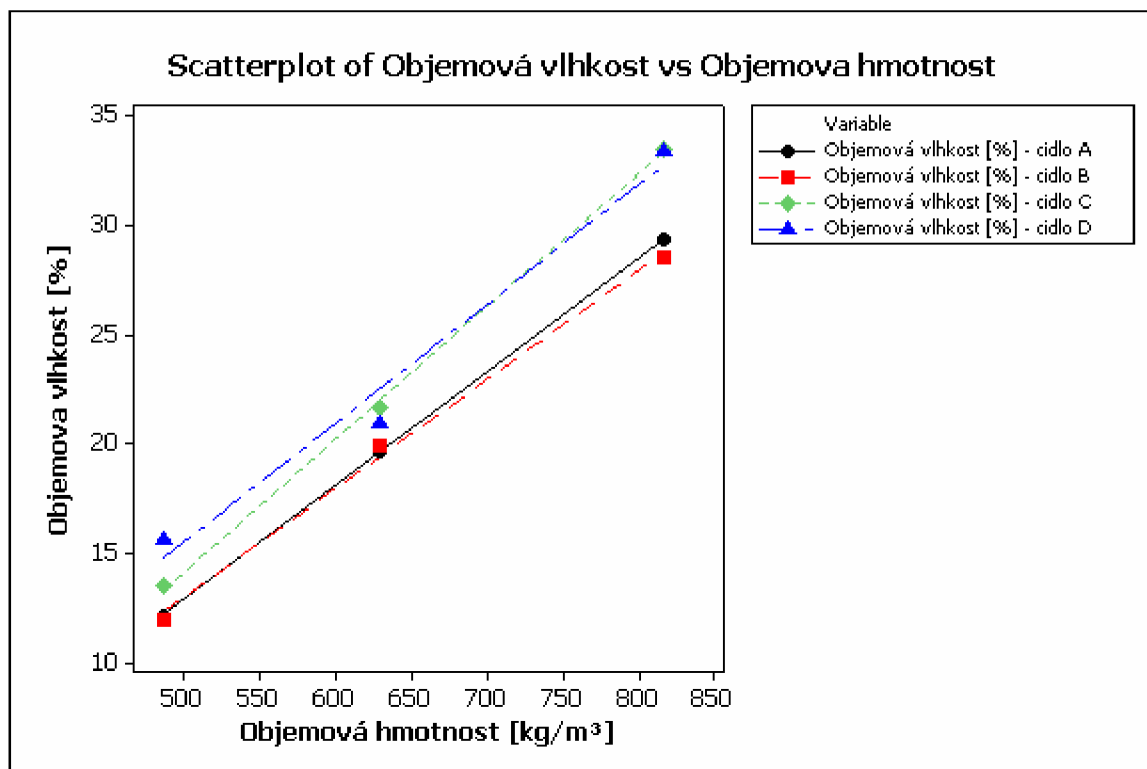
$$\text{Hmotnostní vlhkost SNIMAC D} = 107 + 3.49 \text{ Vlhkost objemova} - 0.176 \text{ Objemová hmotnost}$$

Obr. 23 Rovnice regrese pro hodnoty hmotnostní vlhkosti půdních snímačů A-D

Poslední graf, který byl v programu Minitab 15 zpracován, představuje závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti. Předpokládána byla závislost objemové vlhkosti na uložení, tedy objemové hmotnosti. Z grafu na Obr. 24 je patrné, že tato závislost je pro všechny čtyři snímače lineární. Lze pozorovat malé rozdíly mezi průběhy u jednotlivých čidel, to je způsobeno malými rozdíly naměřených hodnot objemové vlhkosti u každého z čidel.

V přílohách, viz kapitola 3. Grafy závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro snímač A, B, C a D, jsou uvedeny samostatné grafy pro jednotlivé sondy zvlášť i s uvedením regresivní rovnice pro určení hodnoty objemové hmotnosti.

Z grafu je tedy patrné, že pokud budeme zvětšovat objemovou hmotnost, znamená to, že budeme substrát kompostu více zhutňovat, vzroste hodnota objemové vlhkosti. A naopak, bude-li vlhkost v substrátu kompostu příliš velká, stačí zmenšit hodnotu objemové hmotnosti například překopáním kompostu a vlhkost klesne.



Obr. 24: Graf závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti

5.3.8 Výsledky laboratorního měření

Výsledkem laboratorního měření jsou především čtyři spektrální grafy závislosti tří veličin:

1. hmotnostní vlhkosti, určené laboratorní gravimetrickou metodou,
2. objemové vlhkosti, jejíž hodnoty byly získané měřením půdními snímači,
3. objemové hmotnosti, zjištěné vážením definovaného objemu substrátu.

Tyto grafy, sestavené jednotlivě pro každé ze čtyř čidel, jsou výsledkem kalibrace výše zmíněných veličin: objemové hmotnosti, která byla kalibrována na hodnoty hmotnostní vlhkosti.

Na základě těchto grafů je možné určit během měření pomocí snímačů půdní vlhkosti okamžitou hmotnostní vlhkost v kompostu při známé objemové hmotnosti.

Z výsledných grafů je možné vidět rozdíly mezi jednotlivými sondami. Jedná se sice o minimální odchylky, ale i tak se potvrzuje náš předpoklad, že každá sonda bude mít jinou citlivost.

Druhými získanými grafy jsou závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti, tedy na uložení kompostu. U těchto grafů lze pozorovat lineární závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti, tak, jak jsme předpokládali.

5.3.9 Využití laboratorního měření

Jak už bylo naznačeno, bude výzkum pokračovat v provozních podmínkách přímo na kompostu na KČOV v Dražovicích. Na jaře roku 2013 byly v objektu čistírny založeny dva nové komposty v menším měřítku podle stejné metody, jaká byla použita při stavbě prvního kompostu a která je popsána v kapitole 4.1 Metodika kompostování na KČOV. Do tělesa nově založeného kompostu byly instalovány čtyři půdní snímače Virrib, které byly použity i pro laboratorní experimentální měření. Ty budou snímat vlhkost přímo v provozních podmínkách v intervalu jedné hodiny. Bude tak možné pozorovat vývoj vlhkosti během procesu kompostování a na základě spektrálních grafů bude možné určit okamžitou hmotnostní vlhkost kompostu. Přínosem pro měření v poloprovozních a provozních podmínkách je kalibrace snímačů, která zaručuje správné výsledky hodnot objemové, resp. hmotnostní vlhkosti.

Pokud by byly během měření vlhkosti v poloprovozních podmínkách zaznamenány její výrazné poklesy, řešil by se tento problém instalací automatického systému, určeného primárně pro závlahové systémy. Princip spočívá v přítomnosti snímače vlhkosti napojeném na čerpadlo, které zajišťuje přívod vody na do tělesa kompostu. Naopak pokud by byly pozorovány vysoké hodnoty vlhkosti, bylo nutné vyřešit jeho provzdušnění.

6 ZÁVĚR

Kompostování čistírenské biomasy a čistírenských kalů může být budoucím řešením pro všechny malé kořenové čistírny odpadních vod. Jedná se o levný, efektivní a ekologický způsob finální likvidace odpadních surovin, který ke své realizaci vyžaduje pouze dostupné podmínky pro založení (potřebná plocha).

První část práce poskytuje základní informace vztahující se k problematice kompostu a kompostování, se zaměřením na čistírenské kaly. Je sestavena jako literární rešerše odborných informací od autorů, kteří se tomuto tématu věnují.

Praktická část práce je zaměřena na dva samostatné okruhy. V prvním je popisována jednoduchá metodika vybudování kompostu na KČOV, ta je doplněna o fotografie a popis všech použitých materiálů. Metodika byla sestavena podle skutečného postupu při budování reálného kompostu na KČOV v obci Dražovice. Jedná se tedy o metodu, která reálně funguje a na níž byly aplikovány dostupné informace od autorů, kteří se problematikou malých kompostů zabývali. Realizace kompostu z čistírenských kalů a biomasy přímo pro KČOV nebyla v žádné běžně dostupné literatuře dosud popsána, existují pouze neoficiální kompostovací pole bez jakékoliv dokumentace. Na základě popsané metodiky byly postaveny na kořenové čistírně v Dražovicích dva nové komposty. Ty budou sloužit k dalšímu pozorování a aplikaci údajů získaných ve výzkumu, který byl druhou částí této práce.

Druhým okruhem praktické části této práce je laboratorní měření, které mělo za cíl kalibraci vlhkostních půdních snímačů a vytvoření závislosti mezi objemovou vlhkostí, kterou vlhkostní snímače měří, a hmotnostní vlhkostí, která je standardně používána v praxi pro vyjádření vlhkostních poměrů. Součástí výzkumu bylo i potvrzení hypotézy o závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti. Data získaná laboratorním měřením byla zpracována v programu Minitab 15. Výsledkem výzkumu jsou grafy závislostní výše popsaných veličin. Celkem byly vytvořeny 4 grafy, pro každý půdní snímač individuálně. Půdní snímače jsou na začátku května 2013 instalovány do poloprovozních podmínek na KČOV v Dražovicích za účelem budoucího sledování vývoje teploty během procesu kompostování.

Lze tedy konstatovat, že všechny cíle práce byly splněny. Na základě teoretického úvodu do problematiky kompostování, byla popsána jednoduchá metodika založení kompostu

z biomasy a čistírenských kalů na kořenové čistírně odpadních vod, která může sloužit jako jednoduchý a inspirativní popis pro majitele a provozovatele KČOV, kteří mohou zvolit pro likvidaci čistírenských kalů tuto levnou variantu. Fotodokumentace reálného kompostu navíc potvrzuje, že tento způsob v praxi funguje a byl použit v provozních podmínkách. Výsledky laboratorního výzkumu, tedy kalibrace půdních čidel a sestavení grafu závislosti mezi hmotnostní vlhkostí, objemovou vlhkostí a objemovou hmotností, přinesly důležité poznatky pro další práci v oblasti zkoumání procesu kompostování na KČOV. Výsledky budou využity a zohledněny při sledování vlhkosti kompostu v provozních podmínkách.

Důvodem, proč je snaha o zapojení automatického snímače a regulátoru vlhkosti v tělese kompostu je snaha o udržení ideálních podmínek pro tzv. dozrávání kompostu. Při sledování vlhkostních poměrů v daném kompostu lze rychleji dosáhnout výsledného kompostového substrátu, určeného jako produktu pro další využití. Rychlejšším dozráváním kompostu se přímo sníží provozní náklady na realizaci samotného kompostu, neboť se sníží náklady spojené s prostorovou náročností, s nutností dodávat do kompostu enzymatické přípravky na podporu mikrobiálních procesů, nedojde k zakyselení kompostu vlivem vysoké vlhkosti, ani k eliminaci procesů vlivem nízkých vlhkostí. Další měření teprve ukáže, po jaké době dochází k dozrání kompostu i bez překopávání a jakékoliv další manipulace s mechanizací – čímž se také výrazně sníží provozní náklady.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Česká republika. Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady). In: *Sbírka zákonů*. 2008.
- [2] DOHÁNYOS, Michal: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. 2006-05-09 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>. ISSN: 1801-2655.
- [3] HAVLOVÁ, Renata: Vlhkostní vlastnosti materiálů. In: *Http://www.fce.vutbr.cz* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z:http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/01_Pozemni%20stavitelstvi/1_02_Konstrukce%20pozemnich%20staveb/Havlova_Renata.pdf
- [4] JENÍČEK, Pavel. *Kompostování čistírenských kalů*. 2009. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/jenicekp/Kalov%C3%A9%20hospod%C3%A1%C5%99stv%C3%AD/KH%207%20kompost.+chem.%20stab..pdf>
- [5] KNÁPEK, J. - Vašíček, J. - Žídek, O.: Economic Analysis of Biogas Station. In *Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR po vstupu do EU*. Praha: CZ Biom - české sdružení pro biomasu, 2004, s. 95-106. ISBN 80-239-3713-8.
- [6] Kompostování. In: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava* [online]. 2010 [cit. 2013-01-01]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/Kompostovani.pdf
- [7] PLÍVA, Petr, Jan BANOUT, Jan HABART, Antonín JELÍNEK, Maria KOLLÁROVÁ, Amitava ROY a Dana TOMÁNKOVÁ. *Zakládání, průběh a řízení kompostovacího procesu*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2005, 72 s. ISBN 80 - 86884 - 1 1 -2.

- [8] PLÍVA, Petr, JELÍNEK, Antonín, HEJÁTKOVÁ, Květuše: Obecná podoba podnikové normy pro faremní kompost vyrobený kontrolovaným mikrobiálním procesem. *Biom.cz* [online]. 2002-04-12 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/obecna-podoba-podnikove-normy-pro-faremni-kompost-vyrobenny-kontrolovanym-mikrobianim-procesem>>. ISSN: 1801-2655.
- [9] Snímač objemové vlhkosti půdy VIRRIB. *Snímač objemové vlhkosti půdy VIRRIB* [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.amet.cz/virribcz.html>
- [10] ŠIMEK, Miloslav. Skleníkové plyny v půdě. *Vesmír* [online]. Praha: Euromedia Group, 2006, 2008/11, č. 87 [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/3-sklenikove-plyny-v-pude>
- [11] ŠŤASTNÝ, Milan. *Mechanizace kompostování: (studie VTR)*. Praha: Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, 1991, 68 s. ISBN 0862-3562.
- [12] VÁŇA, Jaroslav a Sergej UŠŤAK. *Zřizování a provozování malých kompostáren: Metodika pro praxi*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2007, 20 s. ISBN 9788087011348.
- [13] VOTOUPAL, Bohuslav. *Zpracování čistírenských kalů na ČOV metodou intenzivního kompostování na technický substrát*. České Budějovice, 2009.
- [14] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-7204-507-5.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

KČOV – kořenová čistírna odpadních vod

EO – ekvivalentní obyvatelé

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty vlhkosti (%), obsahu organické hmoty a živin (% sušiny) v surovinách vhodných do kompostu (Plíva a kol. 2005).....	7
Tab. 2: Údaje o plastovém boxu, ve kterém probíhalo měření.....	34
Tab. 3: Hmotnosti a objemové hmotnosti jednotlivých druhů kompostu	37
Tab. 4: Popis jednotlivých měření a jejich číselné označení.....	38
Tab. 5: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 1-12 ..	39
Tab. 6: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 13-24	39
Tab. 7: Hodnoty objemové vlhkosti naměřené půdními snímači Virrib – měření číslo 25-36	40
Tab. 8: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro čerstvě odebraný kompost.....	41
Tab. 9: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro suchý kompost	41
Tab. 10: Stanovení hmotnostní vlhkostí pro vlhký kompost.....	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma anaerobního rozkladu (Knápek, 2004)	13
Obr. 2: Příprava podloží a skladba podkladních vrstev pod kompostem	22
Obr. 3: První vrstva - aplikace mokřadních částí rostlin do výšky 0,5m	23
Obr. 4: Tvorba tělesa kompostu	24
Obr. 5: Odtokový žlab pro odvod vody.....	24
Obr. 6: Těleso kompostu po vybudování (vlevo) po 7 měsících kompostování (vpravo)	25
Obr. 7: Podélný řez kompostem	26
Obr. 8: Příčné řezy kompostem	26
Obr. 9: Trojfázový systém zeminy (Weiglová, 2007).....	28
Obr. 10: Vlevo: Čidlo půdní vlhkosti Extol; Vpravo: snímač půdní vlhkosti Virrib s připojením na datalogger (zdroj: www.elny.cz ; www.trickle-l.com).....	30
Obr. 11: Orientační zkouška vlhkosti (Plíva a kol. 2005)	31
Obr. 12: Vlastní odběr vzorků	31
Obr. 13: Snímač objemové vlhkosti půdy Virrib – kruhová varianta (vlevo), podlouhlá (vpravo)	33
Obr. 14: Ukládání substrátu kompostu se snímačem Virrib.....	35
Obr. 15: Vážení substrátu kompostu v plastovém boxu.....	35
Obr. 16: Program HOBOWare Lite při nastavení parametrů měření.....	36
Obr. 17: Statistická analýza hodnot hmotnostní vlhkosti při gravimetrickém měření	42
Obr. 18: Statistická analýza hodnot objemové vlhkosti měření 1 – 36.....	43
Obr. 19: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač A	44
Obr. 20: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač B	44

Obr. 21: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač C	45
Obr. 22: Závislost hmotnostní vlhkosti na objemové vlhkosti a objemové hmotnosti - Snímač D	45
Obr. 23 Rovnice regrese pro hodnoty hmotnostní vlhkosti půdních snímačů A-D	46
Obr. 24: Graf závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti	47

SUMMARY

Composting of sewage biomass and sewage sludge may be a future solution for all small treatment wetlands. It is a cheap, efficient and environmentally friendly way to the final disposal of waste materials.

First part of thesis provides basic information related to the issue of compost and composting, with the focus on sewage sludge. It is conceived as literature search of technical information from authors who are dedicated to this topic.

The practical part is focused on two separate circuits. The first is described by a simple methodology to build a compost, which is complemented by photographs and descriptions of all the materials used. The methodology has been prepared in accordance with actual progress in building a real compost on small treatment wetlands in the village Drazovice. It is a method that really works and which were applied to the available information from authors who have dealt with the issue of small compost. Based on the methodology described were built on wetlands two new composts in Drazovice. These will serve to further observation and application of the data obtained in the research, which was the second part of this work.

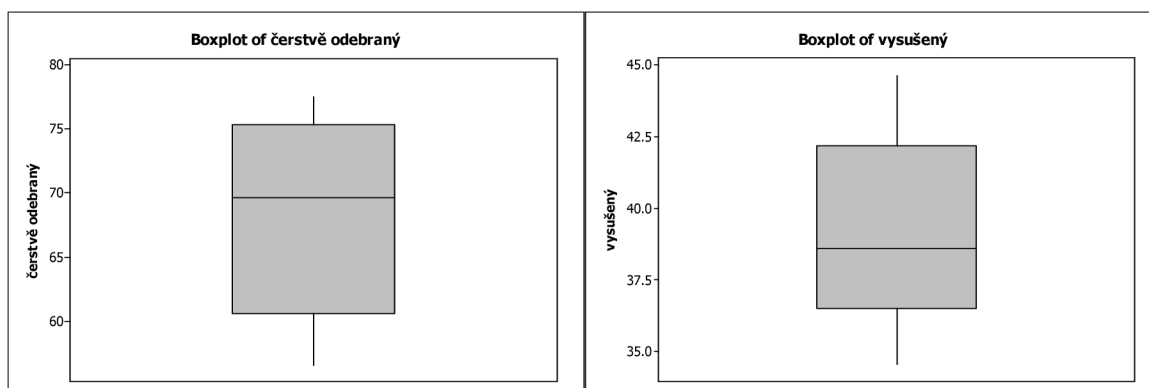
The second area of the practical part of this thesis is a laboratory measurement that was intended to calibrate the soil moisture sensors and a relationship between volumetric water content, which is measured by humidity sensors and gravimetric water content, which is commonly used in practice to represent moisture conditions. Data obtained by laboratory measurements were prepared in program Minitab 15. The research results are dependency graphs of variables which are described above. For each soil sensor were created individually graphs. Soil sensors were installed at the beginning of May 2013 in pilot plant conditions of treatment wetlands in Drazovice for future monitoring of temperature development during the composting process.

SEZNAM PŘÍLOH

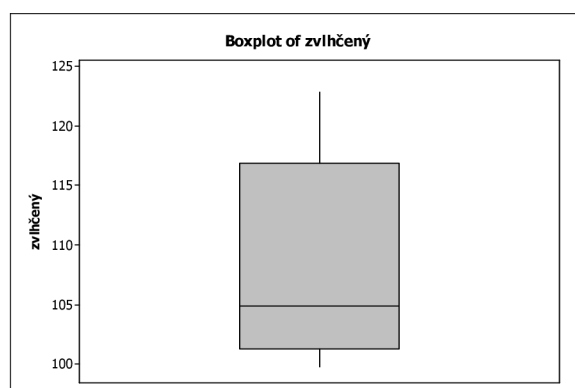
1. Statistické grafy výsledků při měření hmotnostní vlhkosti gravimetrickou metodou 59
2. Statistické grafy výsledků při měření objemové hmotnosti půdními čidly 60
3. Grafy závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro snímač A, B, C a D 66

PŘÍLOHY

1. Statistické grafy výsledků při měření hmotnostní vlhkosti gravimetrickou metodou

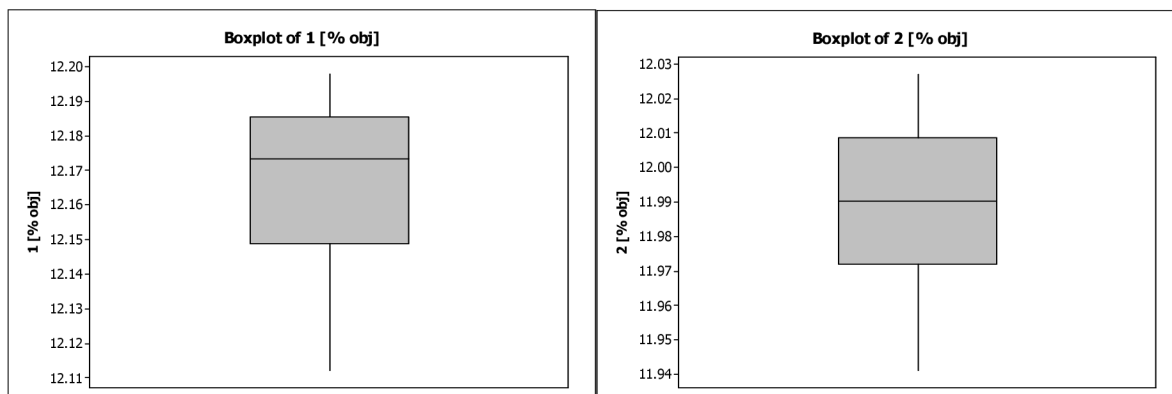


Statistické grafy „Boxplot“ pro měření odebraného a vysušeného kompostu

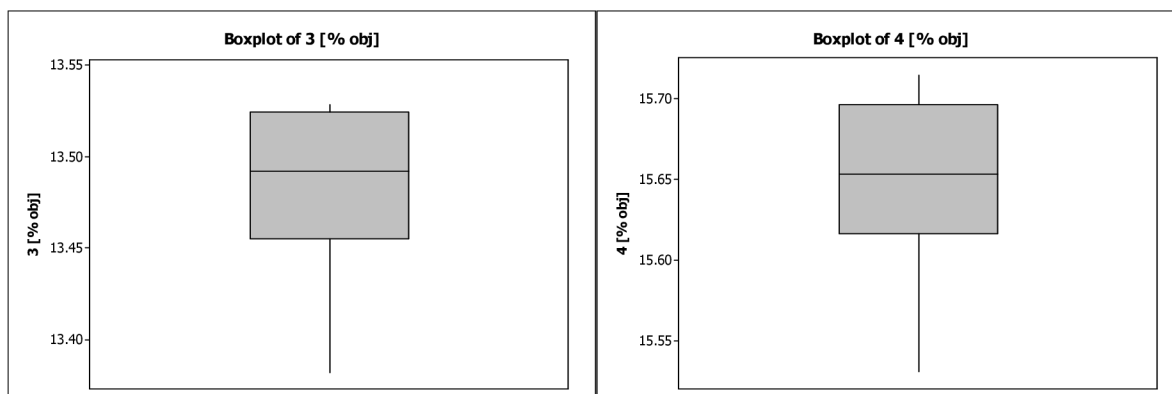


Statistický graf „Boxplot“ pro měření zvlhčeného kompostu

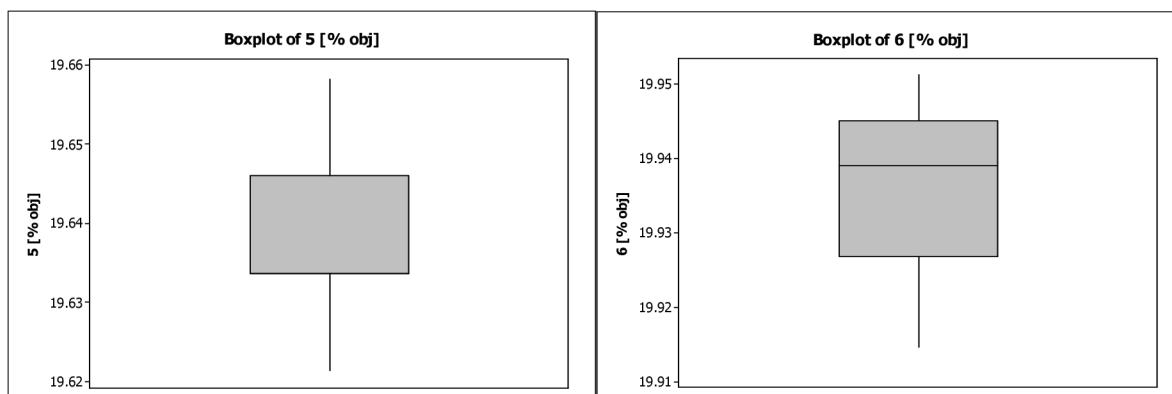
2. Statistické grafy výsledků při měření objemové hmotnosti půdními čidly



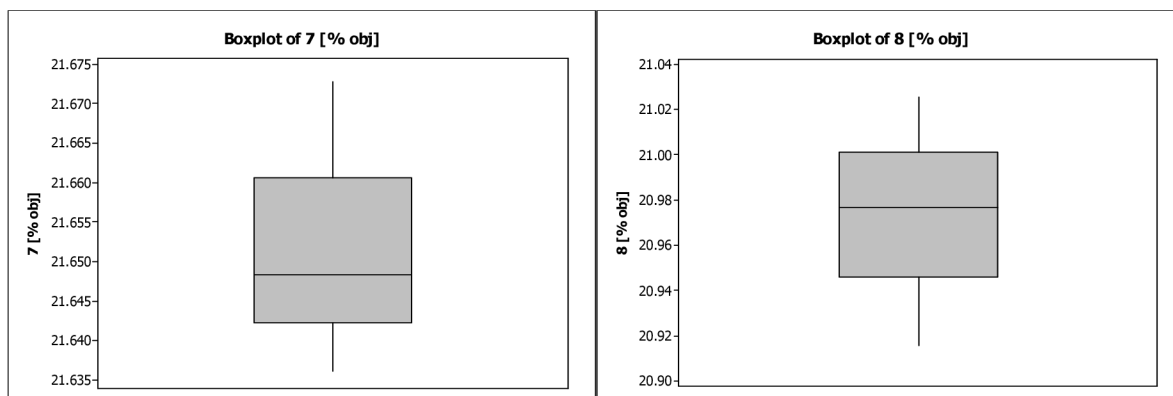
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 1 a 2



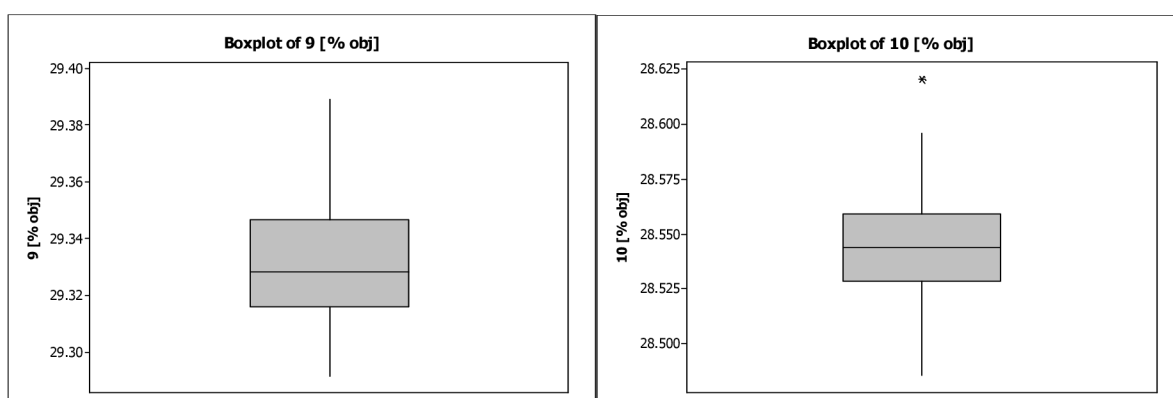
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 3 a 4



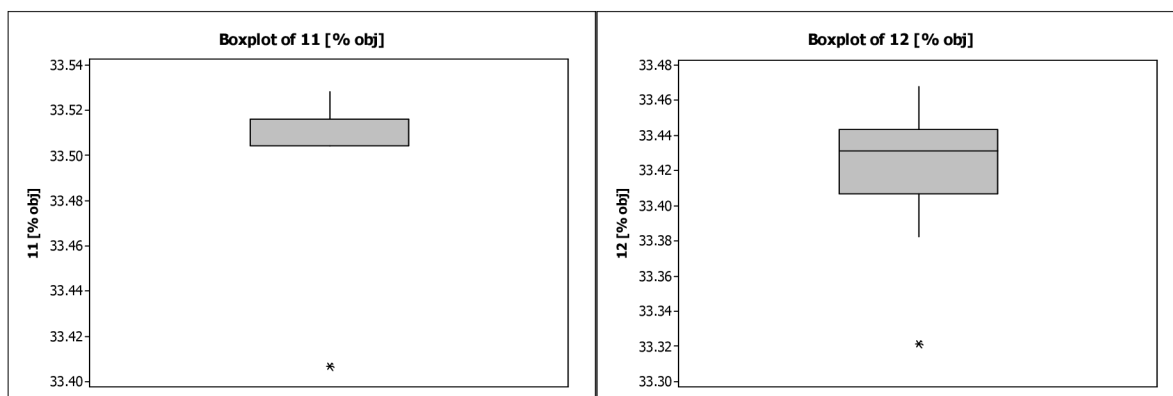
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 5 a 6



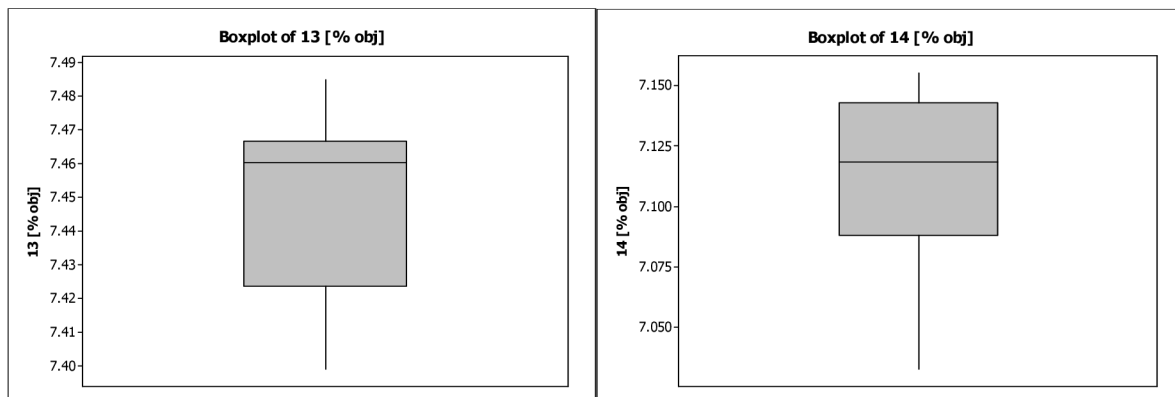
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 7 a 8



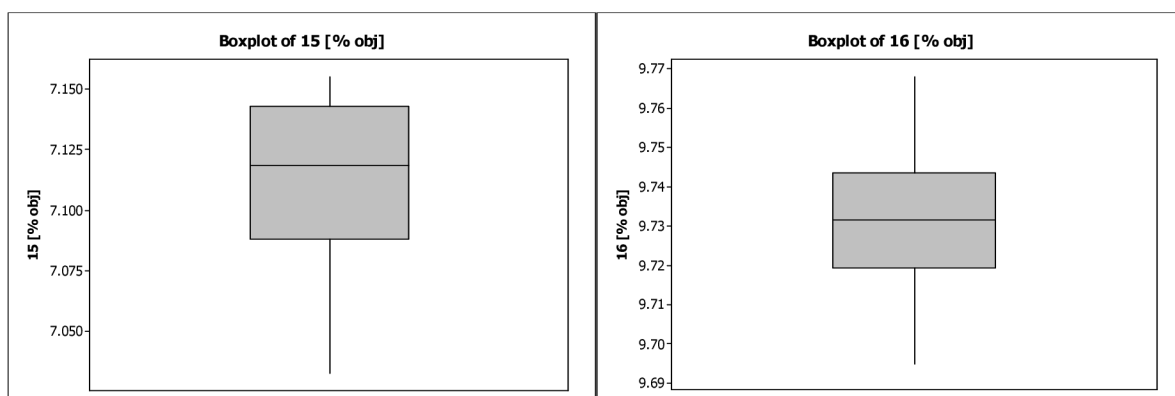
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 9 a 10



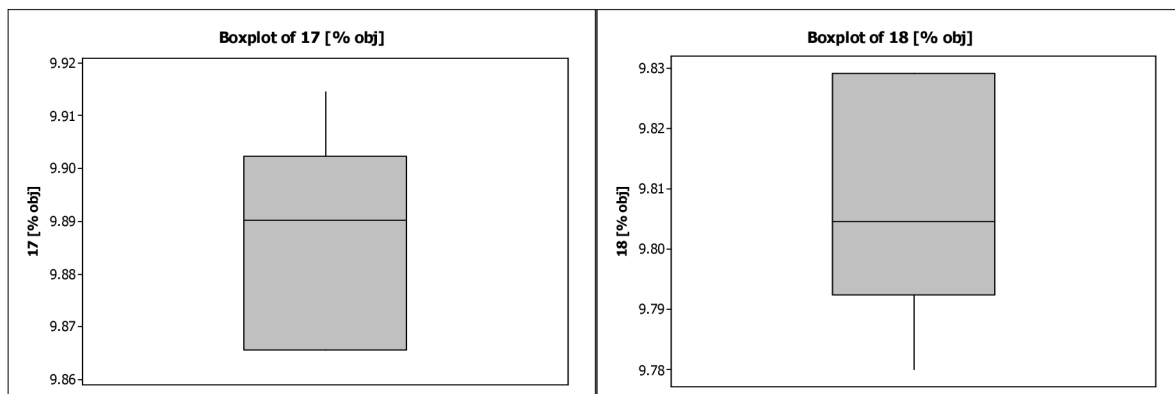
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 11 a 12



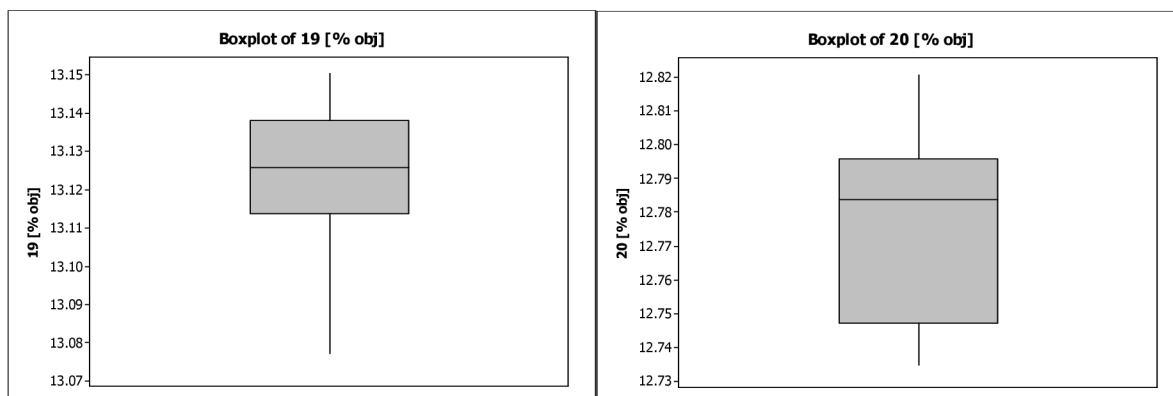
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 13 a 14



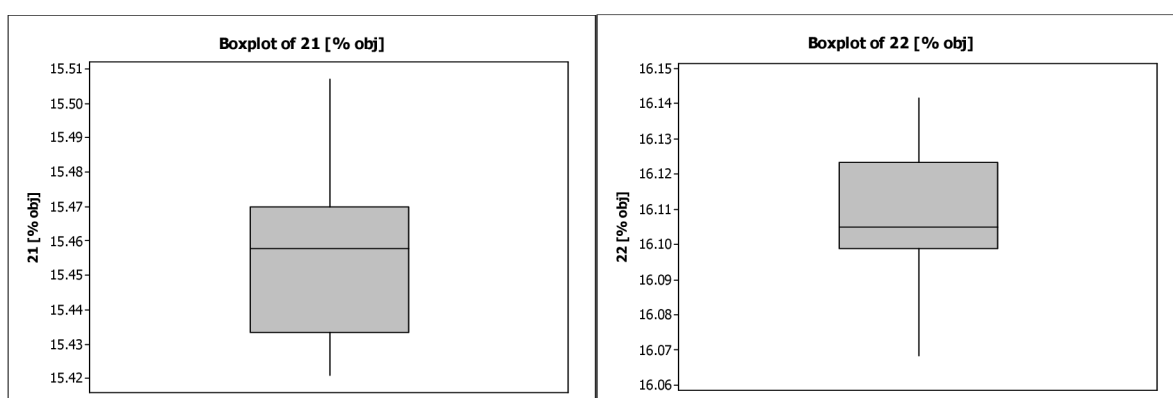
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 15 a 16



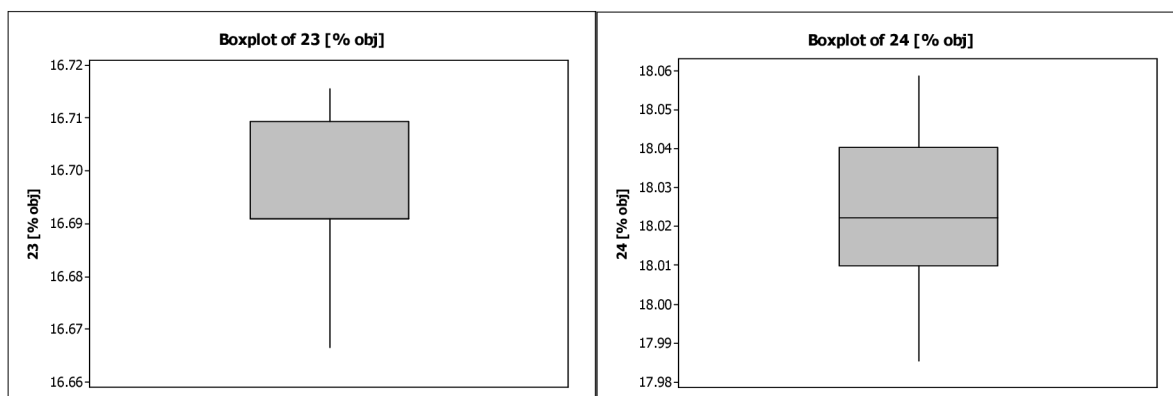
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 17 a 18



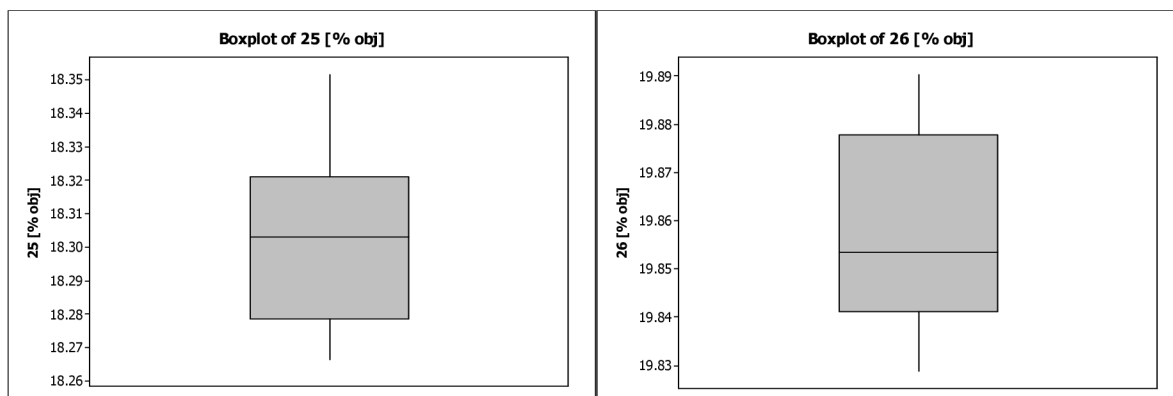
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 19 a 20



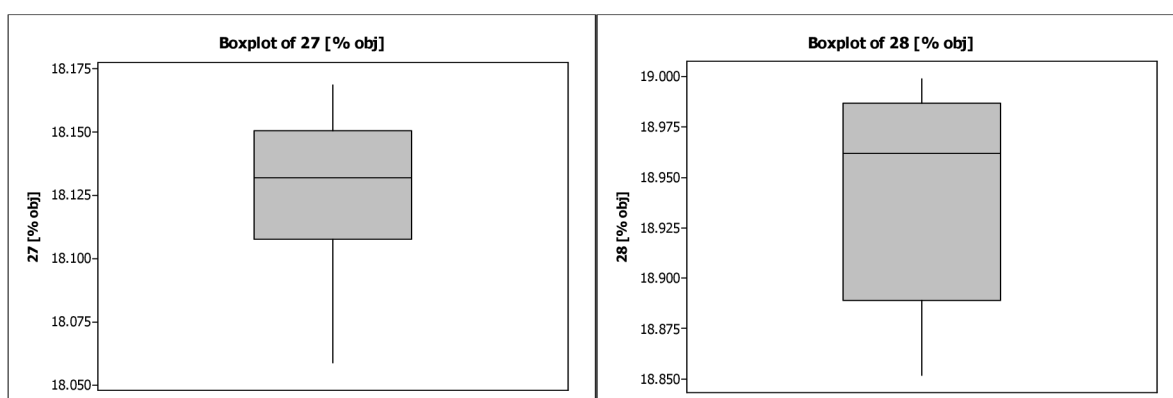
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 21 a 22



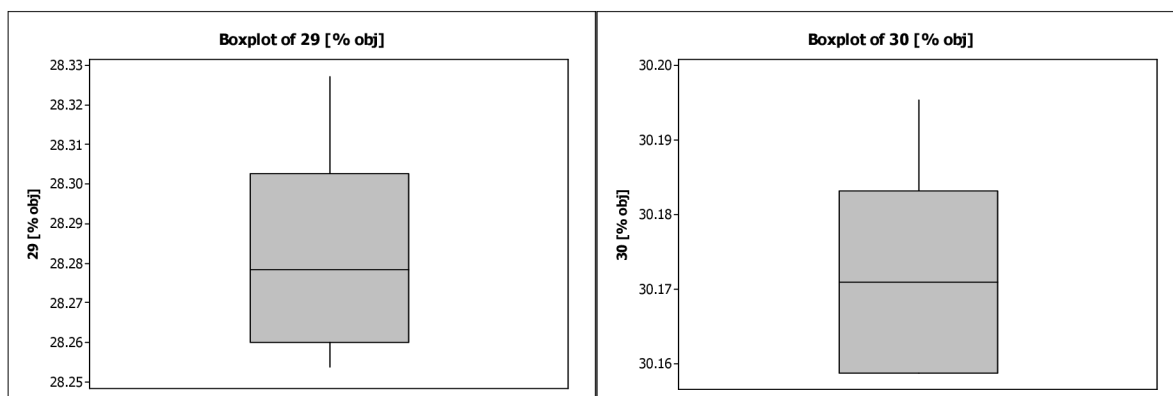
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 23 a 24



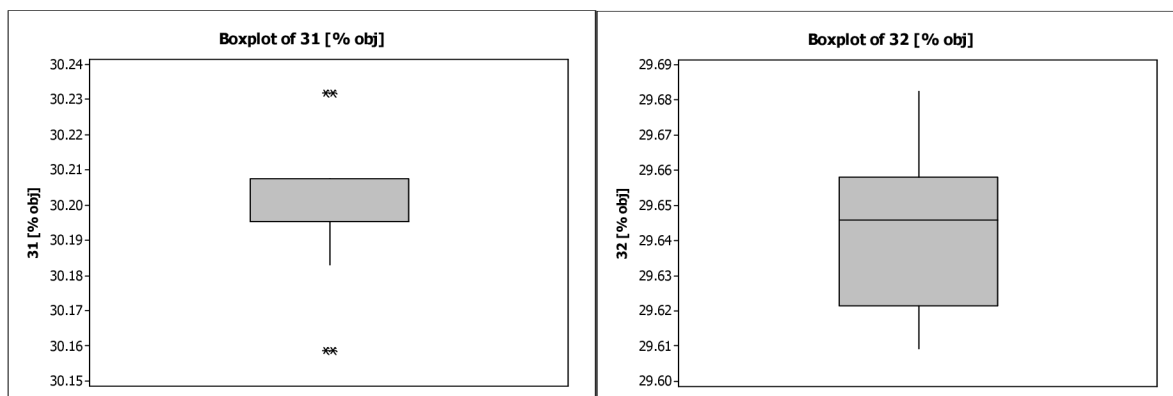
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 25 a 26



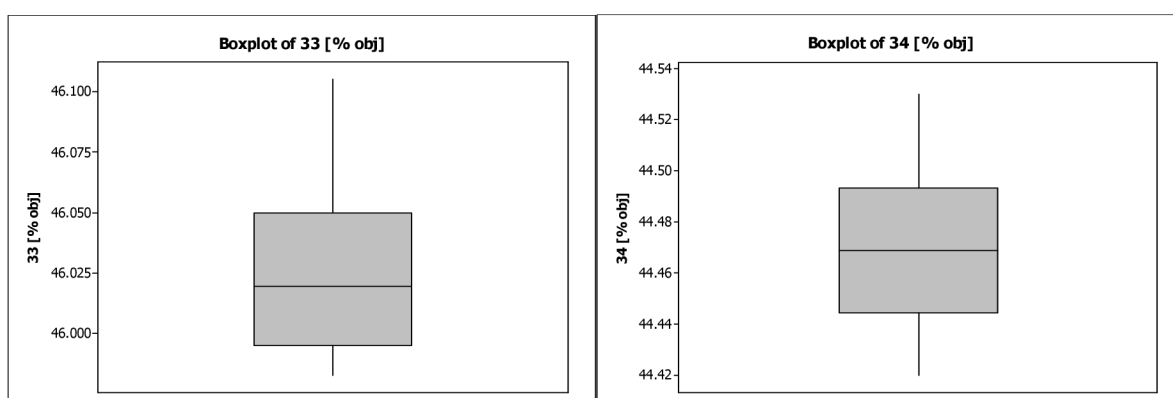
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 27 a 28



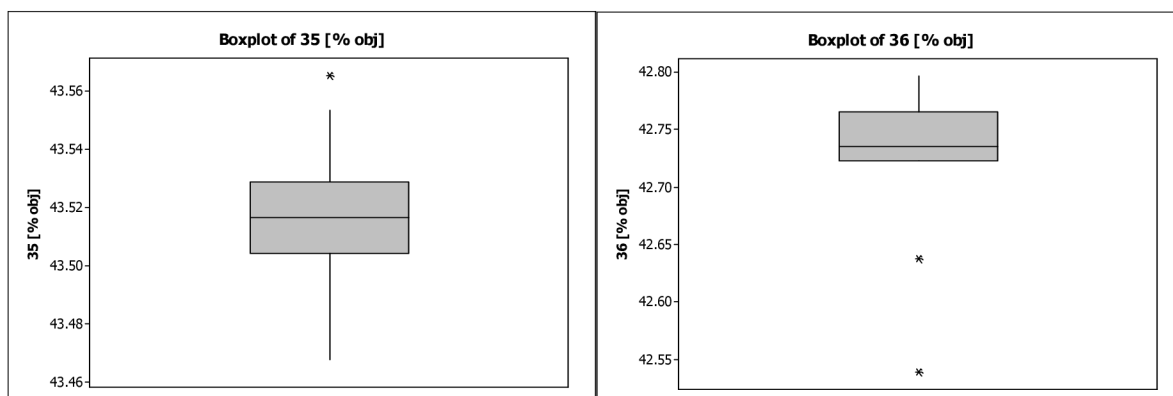
Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 29 a 30



Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 31 a 32

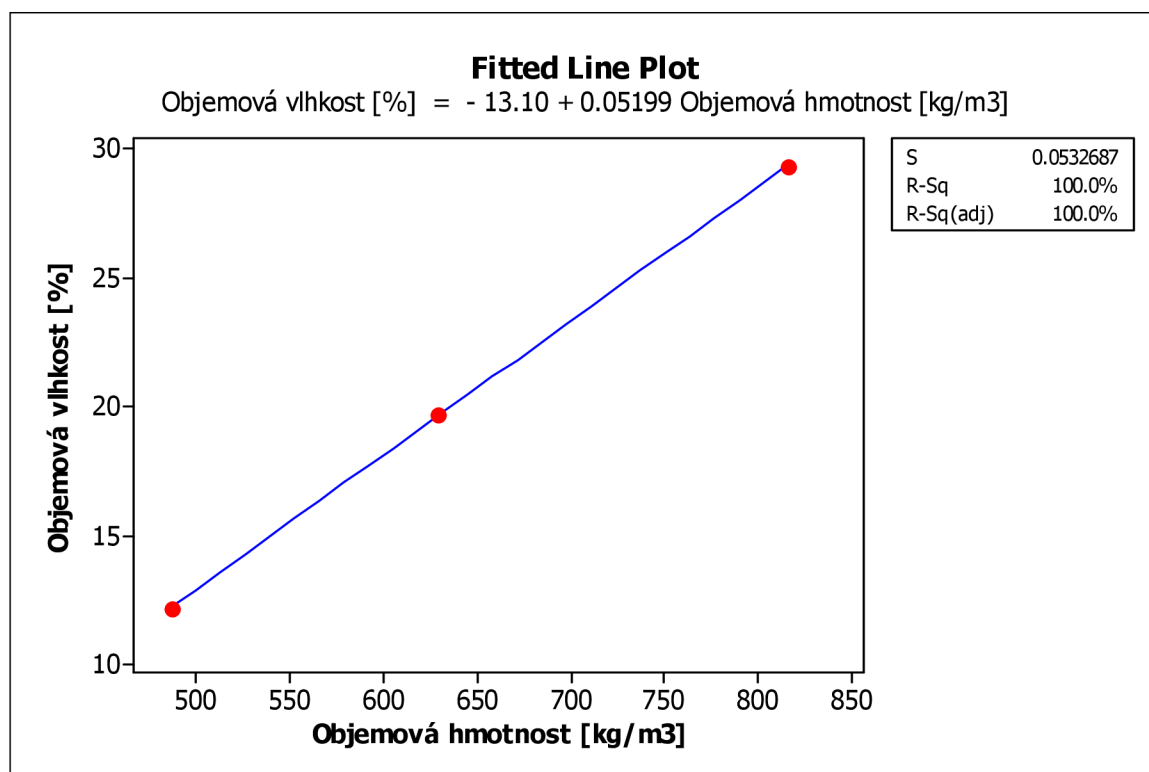


Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 33 a 34

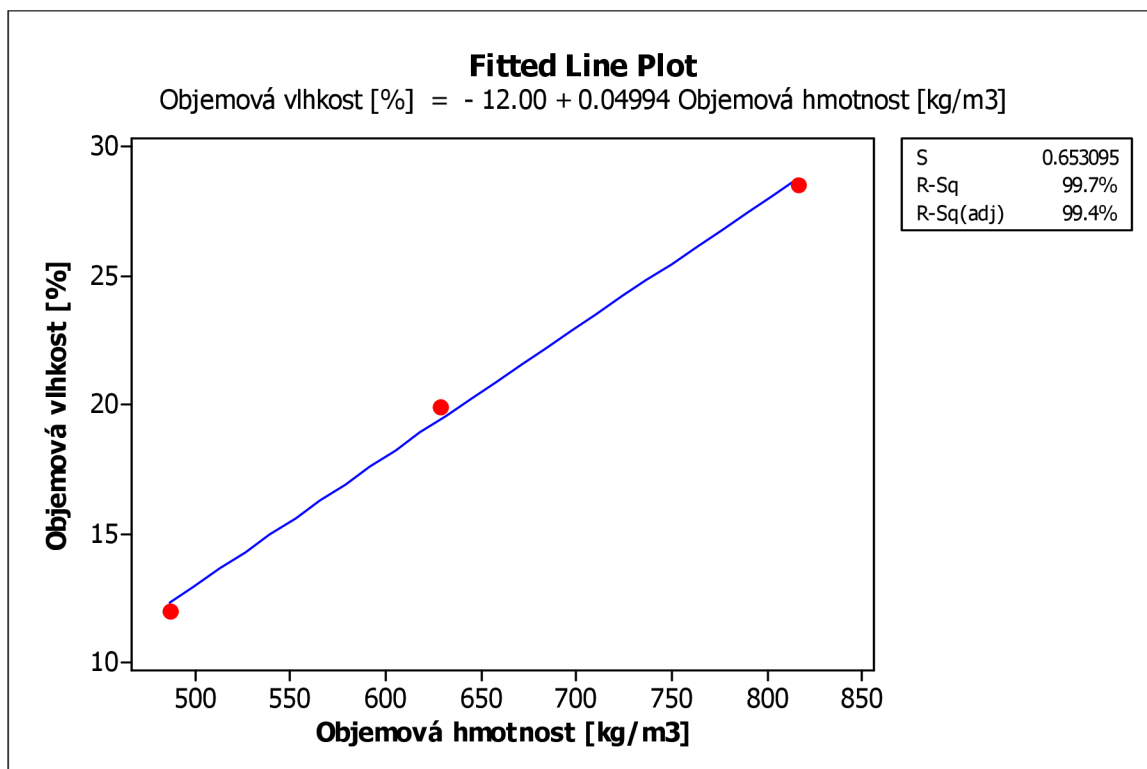


Statistické grafy „Boxplot“ pro měření číslo 35 a 36

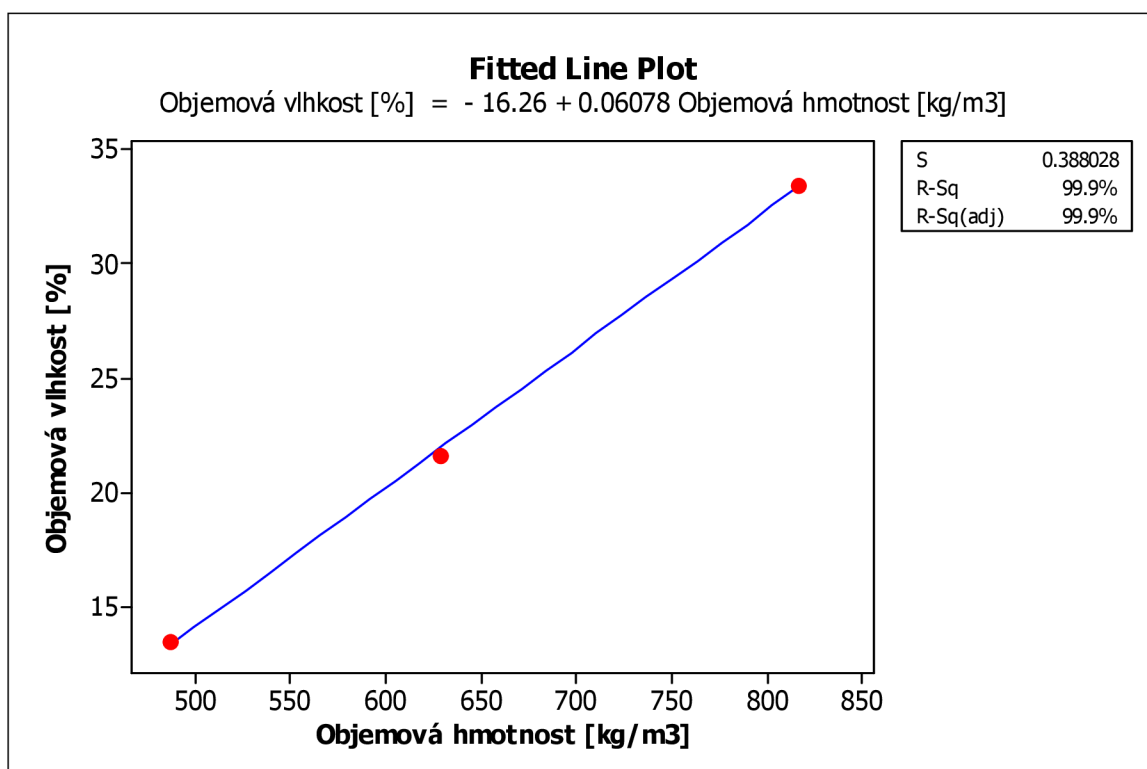
3. Grafy závislosti objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro snímač A, B, C a D



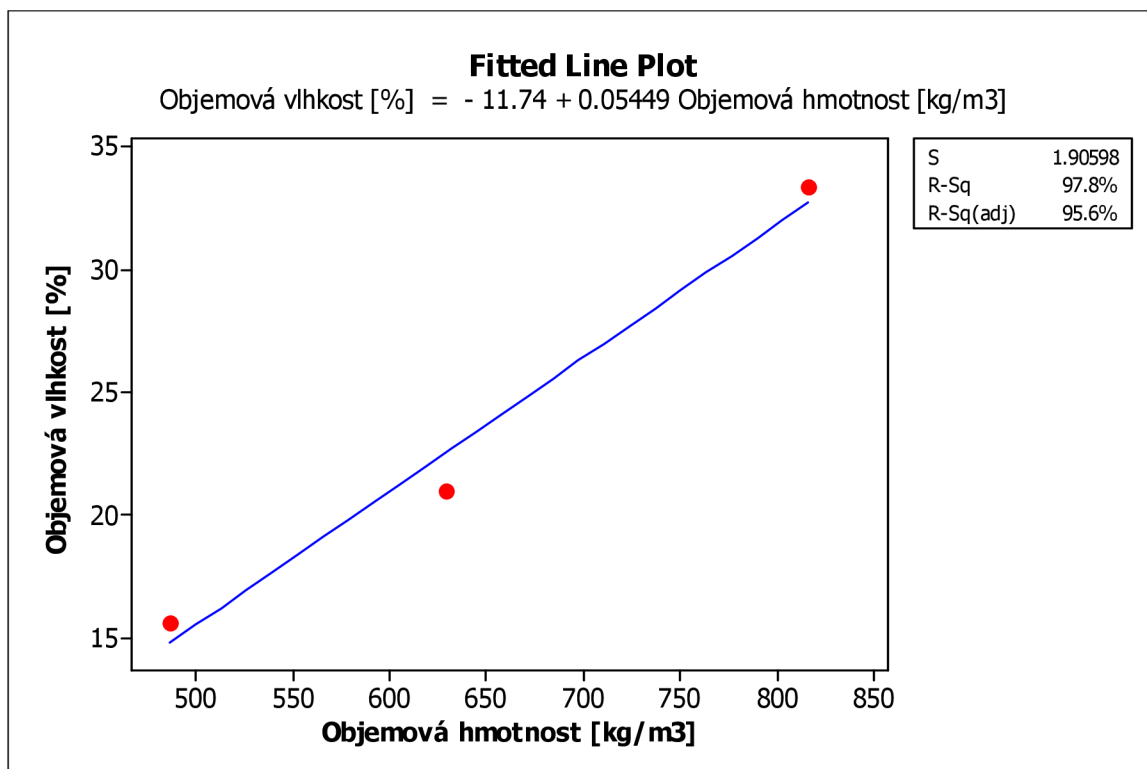
Závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro sondu A



Závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro sondu B



Závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro sondu C



Závislost objemové vlhkosti na objemové hmotnosti pro sondu D