

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované ekologie



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního
prostředí**

Autoreferát disertační práce

Ověření kompostování odpadů z malých ČOV a umělých mokřadů pro recyklaci nutrientů

Verification of composting of the small wastewater treatment plants
and constructed wetlands wastes for nutrient recycling

Ing. Hana Hudcová

Školitel: prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

2018

Doktorská disertační práce „Ověření kompostování odpadů z malých ČOV a umělých mokřadů pro recyklaci nutrientů“ byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře aplikované ekologie, Fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze. S disertační prací je možné se seznámit na oddělení pro vědu a výzkum Fakulty životního prostředí ČZU v Praze.

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. METODIKA DISERTAČNÍ PRÁCE	7
2.1. Cíle práce a základní postup jejich dosažení	7
2.2. Časový harmonogram práce	8
2.3. Výzkumné lokality	10
2.4. Použité metody a postupy	11
2.4.1. Odběr, zpracování, analýza a vyhodnocení vzorků kalů, sedimentů a biomasy.....	11
2.4.2. Zakládka a složení experimentálních kompostů	12
2.4.3. Posouzení vlivu kompostů na produkci vybraných plodin	15
2.4.4. Nádobové pokusy pro pěstování vybraných druhů zeleniny	16
2.4.5. Závlaha rostlin v nádobách	17
2.4.6. Zpracování a analýza vzorků zeleniny	17
2.4.7. Posouzení fytotoxicity kompostů pomocí řeřichového testu	17
2.4.8. Vyhodnocení výsledků.....	18
3. VÝSLEDKY A DISKUZE	19
3.1. Využití kalů zeměmi EU	19
3.2. Využití materiálů z malých ČOV pro přípravu kompostů	23
3.3. Složení a kontaminace použitých kompostů	30
3.4. Testy fytoxicity vybraných směsí kompostů	32
3.5. Nádobové pokusy s plodinami	34
4. ZÁVĚR.....	42
5. POUŽITÁ LITERATURA.....	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AOX	halogenované organické sloučeniny
ASTM	American Society for Testing and Materials (Americká společnost pro testování a materiály)
BN	biologická nádrž
BMUB	Spolkové ministerstvo pro životní prostředí, ochranu přírody a jadernou bezpečnost (Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit)
ČOV	čistírna odpadních vod
ČNI	Český normalizační institut
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
ČSÚ	Český statistický úřad
D/Š	délka/šířka
EC	elektrolytická konduktivita
EFAR	Evropské federace pro zemědělskou recyklaci (European Federation for Agricultural Recycling)
EO	ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
FAO	Organizace pro výživu a zemědělství (Food and Agriculture Organization)
FC	termotolerantní koliformní bakterie (fekální bakterie)
IK	index klíčivosti
ISO	International Standards Organization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
JRC	Společné výzkumné středisko (Joint Research Centre)
KF	kořenový filtr
KČOV	kořenová čistírna odpadních vod
KKO	kompostovaný komunální odpad
KKOV	kompostovaný kal z čištění odpadních vod
KTJ	kolonie tvořící jednotku
MVN	malá vodní nádrž
N _{celk.}	celkový dusík
NPK	dusík-fosfor-draslík
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (Organisation for Economic Co-operation and Development)

$P_{\text{celk.}}$	celkový fosfor
TOC	celkový organický uhlík
VÚV TGM, v.v.i.	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce
US EPA	Agentura ochrany životního prostředí USA (United States Environmental Protection Agency)
ZŽ	ztráta žiháním

1. ÚVOD

Problematika používání kalů v zemědělství je velice složitá a nese s sebou mnoho rizik. Vývoj společné evropské legislativy, stejně jako národních předpisů, je důležitý pro schopnost těmto rizikům předcházet. Je třeba mít taková bezpečnostní opatření, aby nedocházelo k možným únikům kontaminace do povrchových a podzemních vod, aby se zamezilo toxické působení na půdu, rostliny, živočichy a člověka.

Čistírenské kaly jsou druhem odpadu, který je produkován ve vysokém množství a je nositelem velkého množství cenných látek, které mohou být navraceny zpět do půdy i s možností snížení dopadu erozních jevů a deficitu organické složky v půdě. I přesto, že mohou čistírenské kaly obsahovat široké spektrum škodlivých toxických látek, je důležité hledat nové cesty jejich zpracování.

Posouzení míry znečištění rizikovými prvky z odpadních materiálů z malých čistíren (do 1 000 obyvatel), její změny po zpracování kompostováním a přenos rizikových prvků do plodin je jednou z těchto cest.

Prvním cílem disertační práce je rozšířit znalosti o zatížení zmíněných materiálů pocházejících z malých ČOV a umělých mokřadů pro čištění odpadních vod a z několika typů malých vodních nádrží charakteru umělých mokřadů.

Dalším cílem a celým zaměřením práce je ověření využití procesu kompostování různých směsí kalů, sedimentů a biomasy, včetně zahrnutí kalů i z jiných typů domovních a komunálních čistíren odpadních vod, pro recyklaci vázaných nutrientů při prověření zbytkového zatížení, znečištění a možné toxicity. K ověření by měly sloužit nádobové pokusy s vybranými plodinami umožňující popsat rozdíly ve výnosech, obsahu důležitých prvků a přenosu rizikových prvků do užitkových částí plodin.

Rámcová omezení a detailní zaměření experimentální části práce byla stanovena zpracováním rešerše a legislativních omezení pro aplikaci kalů a kompostů, nejen v České republice, ale i zemích Evropské unie.

2. METODIKA DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1. Cíle práce a základní postup jejich dosažení

Disertační práce je zaměřena na problematiku využití odpadů produkovaných v čistírnách odpadních vod z malých zdrojů (do 1 000 EO), přičemž hlavní pozornost je věnována čistírnám využívajícím technologie umělých mokřadů.

Na základě stanoveného cíle byly určeny následující pracovní hypotézy:

Odpady z procesu čištění vod nejsou zatíženy těžkými kovy a arsenem v takové míře, že by nebylo možné jejich přepracování a využití jako hnojiva v zemědělství nebo pro údržbu zelených ploch.

Aplikace přepracovaných odpadních materiálů při pěstování vybraných plodin nebude znamenat jejich nadlimitní zatížení těžkými kovy a arsenem.

Pro jejich ověření, potvrzení či zamítnutí, byly definovány následující fáze práce:

Provedení vstupních analýz odpadních materiálů zahrnujících kaly, sedimenty, kolmatované filtrační materiály a biomasu na obsah nutrientů a rizikových prvků a látek. Zpracování do podoby využitelné pro hodnocení zatížení podle vhodných legislativních a normativních předpisů a materiálů, a to s využitím dat z předchozích výzkumů VÚV TGM, v.v.i. v období 2007 – 2012.

Následná příprava vhodných směsí těchto materiálů s využitím biomasy z údržby obecní zeleně, která je v obcích běžně produkovaná a využívána ke kompostování.

Sledování zrání kompostů, změny organických látek, nutrientů, vybraných a rizikových prvků, mikrobiálního znečištění v průběhu kompostování a to s cílem ověřit použitelnost zmíněných odpadů formou kompostů v zemědělství anebo údržbě zeleně.

Ověření nebezpečnosti vstupních materiálů a výsledných kompostových směsí pomocí rozborů obsahu rizikových prvků a látek, mikrobiologickými rozbory a fytotoxickými testy.

Posouzení vlivu kompostů na produkci a zatížení vybraných plodin pomocí nádobových pokusů.

Pro naplnění cíle a ověření hypotéz byl stanoven podrobný časový plán.

2.2. Časový harmonogram práce

1. fáze: Rešeršní práce

Zpracování rešerše k jednotlivým tematikám souvisejícím se zadáním disertační práce v přiměřeném rozsahu: mokřady v krajině, umělé mokřady pro čištění vod, kořenové čistírny, biologické a retenční nádrže, procesy čištění vod v kořenových ČOV, legislativa související s hodnocením kontaminace kalů a jejich použitím v zemědělství, průzkum kvality kalů v České republice, použití kalů v zemědělství, kompostování kalů a odpadů z procesů čištění vod, chování těžkých kovů v systému půda - rostliny, posouzení fytotoxicity kompostů.

2. fáze: Odběry a rozborů vstupních odpadů (kalů, sedimenty, biomasa) využitých pro zpracování kompostováním

Postupné shromáždění výsledků rozborů kalů, sedimentů, kolmatovaných materiálů a vegetace z umělých mokřadů a zelených ploch (tráva a štěpka) a objektů mechanicko-biologického čištění odpadních vod z vlastních odebraných vzorků, realizovaných v rámci vybraných výzkumných projektů VÚV TGM, v.v.i. za období 2013 až 2017, doplněných o výsledky vzorků z předchozích let (2007 – 2012), a to z procesů čištění vod na ČOV v Dražovicích a Hostětíně (extenzivní technologie – mechanické předčištění umělé mokřady – kořenové filtry + dočišťovací biologická nádrž), z ČOV ve Starovicích (aktivační technologie se separací a odvodněním kalu), domovních kořenových ČOV v obci Křtiny, domovních septiků z obce Lhotka u Hranic, ze souboru aerobně-anaerobních ČOV technologie Anacomb (velikostní kategorie od 5 EO do 200 EO) a malých vodních nádrží.

Harmonogram sledování jednotlivých vstupních objektů a odpadů:

- 1) Malé komunální čistírny do 1 000 EO
 - ČOV Dražovice v období 2012 – 2017
 - ČOV Hostětín v roce 2014
 - ČOV Starovice v letech 2014 a 2017
- 2) Septiky domovních kořenových čistíren v období 2012 – 2015
- 3) Anaerobně-aerobní čistírny typu Anacomb v letech 2012 a 2014
- 4) Sedimenty z biologických nádrží
- 5) Sedimenty retenčních malých vodních nádrží (MVN) – MVN Dražovice, Želeč, Němčice a Velký Rybník v letech 2013 – 2016
 - ČOV Dražovice a ČOV Hostětín v letech 2012 – 2015

- 6) Kolmatované filtrační materiály
 - ČOV Dražovice v roce 2012
- 7) Vegetace umělých mokřadů - rákos obecný – v roce 2013

3. fáze: Založení experimentálních kompostů

Byly studovány dvě varianty založení kompostů – v plastových kompostérech a pod fólií.

V průběhu kompostování byly odebírány směsné vzorky vznikajícího kompostu k analýzám obsahu nutrientů, sušiny a ztráty žíháním, vybraných a rizikových prvků a zjištění aktuální míry mikrobiologické kontaminace.

Připravené sady kompostů:

2013 – K-MČ (kompost s kalem z mechanického předčištění ČOV Dražovice) a K-KF (kompost s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů ČOV Dražovice) v kompostérech, 2K-KF (z kolmatované svrchní vrstvy 3. kořenového filtru ČOV Dražovice) pod fólií

2014 – 1K-MČ (kompost s kalem z mechanického předčištění ČOV Dražovice) a 1K-KF (s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů ČOV Dražovice) v kompostérech

2015 – K-MČ (kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV Dražovice bez preparátu) a K-MČ-P (kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV Dražovice s preparátem) pod fólií

4. fáze: Posouzení fytotoxicity kompostů

Ze sady kompostů založených v roce 2015 a připravených z odpadů ČOV Dražovice byly v roce 2016 odebrány vzorky pro testy fytotoxicity na semenech řeřichy.

5. fáze: Posouzení vlivu kompostů na produkci vybraných plodin

Posouzení vlivu kompostů na produkci vybraných plodin bylo prováděno pomocí nádobových pokusů. Mezi studované plodiny byly i na základě studia literatury vybrány: hlávkový salát a rajče tyčkové. Pokusy byly připraveny v první části vegetačního období, kdy se obvykle sází uvedené plodiny ve venkovních podmínkách (květen, červen) a probíhaly až do sklizně. U rostlin salátu po dobu cca 1 měsíce, u rostlin rajčat do podzimu (cca polovina října). Užitkové části rostlin salátu (hlávky) byly sklizeny jednorázově. U rostlin rajčat byly

plody sklizeny ve zralosti po celou dobu trvání pokusu a ukládány v mrazáku pro konečné zpracování.

Připravené sady nádobových pokusů:

2014 – 1. sada nádobových pokusů – plodiny saláty a rajčata

2015 – 2. sada nádobových pokusů – plodiny saláty a rajčata

2016 – 3. sada nádobových pokusů – plodiny saláty a rajčata

První sada nádobových pokusů, připravená v roce 2014, byla cvičná, na níž byla prakticky dotažena metodika průběhu pokusu. Výsledky z této sady nebyly využity v další fázi řešení práce týkající se zhodnocení nádobových pokusů a vlivu přídatku kompostových směsí na změnu výnosu a obsahu sledovaných prvků v rostlinách salátů a rajčat.

2.3. Výzkumné lokality

Pro studii vlivu kompostování kalů a odpadů z kořenových čistíren na přenos nutrientů a polutantů do vybraných druhů zeleniny byly využity kalý a odpady z kořenové čistírny v obci Dražovice (Česká republika, Jihomoravský kraj, lokalizace: N 49°11.84652', E 16°56.56958', v provozu od roku 1999 pro cca 800 obyvatel). Další hlavní lokality, na nichž probíhal průzkum složení a zatížení odpadů byly kořenová čistírna v obci Hostětín (Česká republika, Zlínský kraj, lokalizace: N 49°3.16548', E 17°52.58852', v provozu od roku 1996 pro cca 250 obyvatel) a mechanicko-biologická čistírna v obci Starovice (Česká republika, Jihomoravský kraj, lokalizace: N 48°57.53993', E 16°42.52737', v provozu od roku 2011 pro cca 900 obyvatel).

Technologická linka obou kořenových ČOV zahrnuje:

1. stupeň mechanického předčištění – dešťový oddělovač, dešťová zdrž, typizovaný šterbinový lapák písku horizontální s jemnými česlemi a typizovaná usazovací nádrž,
2. stupeň biologického čištění – kořenové filtry (pole), horizontálně protékané, s podpovrchovým tokem s porostem rákosu obecného (v Hostětíně kombinované s chrasticí rákosovitou),
3. dočišťovací stupeň – biologická nádrž s převládajícími aerobními podmínkami.

Čistírna odpadních vod obce Starovice čistí, na rozdíl od dvou předcházejících napojených na jednotné kanalizační systémy, samostatně přiváděné splaškové odpadní vody.

Čistírna je navržena jako mechanicko-biologická se systémem střídavé nitrifikace a denitrifikace, s aerobní stabilizací přebytečného kalu.

Průzkum kalů a biomasy vegetace kořenových filtrů proběhl i u dvou domovních kořenových čistíren v obci Křtiny na Brněnsku. Obě čistírny mají technologické schéma: vícekomorový biologický septik a umělý mokřad – kořenový filtr s horizontálním prouděním s návrhovou plochou 5 m² na obyvatele, tedy dle zásad uváděných např. v publikaci Šálek a Tlapák (2006). Jedna čistírna byla navržena pro čtyři obyvatele, druhá pro 10 obyvatel s možností přítoku vod až od cca 23 návštěvníků společenských akcí v lokalitě.

Průzkum kalů proběhl také u 13 balených mechanicko-biologických čistíren odpadních vod sledovaných v rámci výzkumného projektu TA02021032 typu Anacomb Asio a u dvou dalších domovních septiků v obci Lhotka u Hranic nad Moravou, které byly sledovány v rámci výzkumnému projektu VÚV TGM, v.v.i., bez napojení na další stupeň čištění. Oba septiky byly vybudovány jako vícekomorové pro čištění vod od čtyř až pěti obyvatel.

2.4. Použité metody a postupy

2.4.1. Odběr, zpracování, analýza a vyhodnocení vzorků kalů, sedimentů a biomasy

Vzorky kalů byly odebírány časově jako bodové, ale prostorově směsné. Vzorky byly odebírány z kalové sekce anaerobních a aktivačních ČOV. U ČOV s umělými mokřady (kořenové ČOV) byly odebírány z objektů mechanického předčištění (vyhňovací prostor šterbinových usazovacích nádrží anebo komory septiků). Vzorky sedimentů z nádrží byly odebírány také jako časově bodové, a to pomocí Ekmanova drapáku, z více míst přítokové a nátokové zóny.

Vzorky materiálu kolmatovaného uniklým kalem byly odebírány z kořenových filtrů jako časově bodové a prostorově směsné. Vzorky byly odebírány z povrchu. Pro stanovení sledovaných prvků byla u vzorků kolmatované vrstvy separována frakce pod 0,063 mm.

Vzorky biomasy byly v případě mokřadní vegetace na povrchu kořenových filtrů sbírány kosením nadzemní biomasy ze čtverce 0,25 x 0,25 m ve vegetační sezóně. Biomasa byla sbírána ze tří čtverců a následně smíchána. Po odběru byla biomasa vysušena. Další úprava spočívala v nastříhání suché biomasy na kousky do délky 5 cm. Poté bylo odebráno menší množství ke stanovení sušiny a ztráty žiháním a k lyofilizaci a přípravě materiálu k analýzám.

Vzorky byly umístěny do vzorkovnice z PE a v chladicích boxech přepraveny do laboratoře. V laboratoři byly vzorky homogenizovány, lyofilizovány a dále zpracovány k analýzám – stanovení sušiny, ztráty žiháním, nutrienty a vybrané prvky (N, P, Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, As), těžké kovy (Al, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), ukazatele mikrobiálního znečištění (termotolerantní koliformní bakterie a enterokoky). Analýzy byly prováděny podle akreditovaných postupů zavedených v laboratořích VÚV TGM, v.v.i.

Celkový dusík byl stanoven modifikovanou Kjeldahlovou metodou dle ČSN ISO 11261. Celkový fosfor byl stanoven pomocí kyvetového testu LCK 348 (fa HACH-LANGE) na spektrofotometru DR 3900 s wolframovou lampou (Vis).

Ke stanovení Al, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn a Zn byl každý vzorek (přibližně 1 g) mineralizován v teflonové nádobce pomocí zařízení (MLS-1200 MEGA) za použití 3 ml konc. HNO₃ a 1 ml 30% H₂O₂. Nádobky se uzavřely a nechal se proběhnout mineralizační cyklus. Po ochlazení se obsah nádobky kvantitativně převedl do 100 ml odměrné baňky.

Stanovení Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn a Zn bylo provedeno metodou plamenové atomové absorpční spektrometrie (AAS-plamen) na přístroji AANALYST 400 firmy PERKIN ELMER. Stanovení Al, As, Cd, Cr, Cu, Ni a Pb bylo provedeno metodou atomové absorpční spektrometrie – elektrotermické atomizace (AAS-ETA) na přístroji AANALYST 600 firmy PERKIN ELMER. Pro stanovení obsahu jednotlivých kovů byla použita metoda kalibrační křivky. Správnost zjištěných koncentrací byla ověřována pomocí souběžné analýzy interního a referenčního materiálu.

Stanovení Hg bylo provedeno na přístroji AMA-254, který je nakalibrován dle manuálu výrobce. Z předupraveného vzorku bylo naváženo cca 0,1 g. Zjištěný obsah rtuti odpovídal vždy průměru dvou až tří paralelně prováděných stanovení. Správnost zjištěných koncentrací byla ověřována pomocí souběžné analýzy interního a referenčního materiálu. Sušina a vlastní ztráta žiháním byly stanoveny dle akreditovaného interního předpisu (IP ZCHR-06) v laboratořích VÚV TGM, v.v.i.

2.4.2. Zakládka a složení experimentálních kompostů

V roce 2013 byly v plastových kompostérech o objemu 300 litrů založeny dva komposty (obrázek 2.1) – jeden s kalem z mechanického předčištění ČOV Dražovice (označen K-MČ) a druhý s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů této ČOV (označen K-KF). Vrstvy těchto kalů byly proloženy vrstvami trávy ze sečení zelených ploch areálu

čistírny a vrstvami mokřadní vegetace z kořenových filtrů čistírny (rákos obecný). Poměr vstupních materiálů odpovídal požadavku na doporučený poměr C/N, který je uváděn v rozpětí 20 až 30/1 (národní doporučení uvádí např. Plíva et al. (2002); celosvětově uvádí doporučení např. Rao et al. (1995)), přičemž přidávání zelené hmoty při kompostování čistírenských kalů pomáhá upravit – zvýšit podíl C/N (Alidadi et al., 2007). Pro připravené kompostované směsi byl následující: 1,5 dílu kalů/2,5 dílu trávy/2,5 dílů mokřadní vegetace z kořenových filtrů. Z výpočtu vyplynul vstupní poměr C/N = 24/1. Tyto komposty byly využity k přípravě směsí pro cvičnou sadu nádobových pokusů v roce 2013.

V březnu 2013 proběhlo čištění třetího kořenového filtru dražovické čistírny. Byla sejmuta horní kolmatovaná vrstva KF do hloubky 5 – 10 cm včetně povrchových usazenin a zbytkové biomasy po kosení suchého rákosu, které proběhlo měsíc před čištěním. Materiál z čištění byl uložen na mezideponii. Z té byly odebrány 4 m³ pro zakládku lichoběžníkového průřezu krytou PE černou nepropustnou fólií v dubnu 2014. Zakládka byla ponechána pod fólií bez umělého provzdušňování až do roku 2015, kdy byla využita k nádobovým pokusům jako kompost 2K-KF.

V roce 2014 byly, dle postupu z roku 2013 a s využitím stejných biologických materiálů, opět založeny dva komposty – jeden s kalem z mechanického předčištění ČOV Dražovice (označen K-MČ) a druhý s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů (označen K-KF) v plastových kompostérech o objemu 300 litrů.

V roce 2015 byly komposty založeny v zakládkách lichoběžníkového průřezu krytých PE černou nepropustnou fólií o objemu 100 litrů (obrázek 2.2). Uložení vrstev bylo následující: spodní vrstva 10 cm - zavadlá tráva, nad ní 5 cm vrstva kalu z mechanického předčištění ČOV Dražovice (sušina kalu cca 14 %), nad to 15 cm vrstva - zavadlá tráva, dále 5 cm vrstva kalu z mechanického předčištění ČOV Dražovice (sušina kalu cca 14 %) a vrchní vrstvu tvořila 10 cm vrstva zavadlé mokřadní vegetace z kořenových filtrů. První zakládka byla bez přídatku preparátu. Do druhé zakládky byl přidáván biologický bakteriálně-enzymatický preparát „ENVICOMP komposty“ pro nastartování a urychlení procesu zrání. Tento přípravek je směsí zejména anaerobních bakterií, jejichž přidáním do kompostovaného materiálu dojde k výraznému zkrácení doby nutné pro kompostování, a to bez ztráty výživných vlastností kompostu. Preparát byl dávkován dle pokynů od výrobce.

Během procesu kompostování směsí v letech 2013, 2014 a 2015 byla sledována teplota vzduchu v okolí a teplota a vlhkost prostředí v kompostu. Provzdušňování zakládek probíhalo ručním překopáním (první po 3 týdnech, následně vždy po měsíci).

Průběžně byly odebrány směsné vzorky vznikajícího kompostu k analýzám aktuální míry mikrobiologické kontaminace (enterokoky, termotolerantní koliformní bakterie), obsahu nutrientů, vybraných prvků (N, P, K, Na, Ca, Mg, Mn, Fe a Al) a rizikových prvků (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn). Dále byla sledována sušina, ztráta žíháním. Odběr vzorků proběhl pro komposty založené v roce 2014 po 4 a 12 měsících od založení, pro komposty založené v roce 2015 po 4, 7 a 12 měsících od založení. Homogenizované vzorky použitých kompostů a půd byly lyofilizovány a poté zpracovány způsobem identickým se zpracováním vzorků kalů.



Obr. 2.1. Zakládka materiálů do plastových kompostérů objemu 300 litrů (horní a prostřední řada fotografií) a výsledné komposty (dolní řada fotografií)



Obr. 2.2. Zakládka materiálů pod polyetylenovou folií

Pro nádobové pokusy byly použity tyto substráty z kompostů:

2015 – jednoleté směsi „1 K-MČ“ (kompost založený s kalem z mechanického předčištění), „1 K-KF“ (kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů) a dvouletá směs „2 K-KF“ (kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru)

2016 – jednoleté směsi „K-MČ“ (kompost založený s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu) a „K-MČ-P“ (kompost založený s kalem z mechanického předčištění s aplikací startovacího preparátu)

2.4.3. Posouzení vlivu kompostů na produkci vybraných plodin

Posouzení vlivu kompostů na produkci vybraných plodin bylo prováděno pomocí nádobových pokusů v letech 2015 a 2016. Mezi studované plodiny byly i na základě studia literatury vybrány: locika salátová, neboli salát hlávkový (*Lactuca sativa* L.) - odrůda Maršalus a rajče jedlé, tyčkové (*Solanum lycopersicum* L.) - odrůda Tornado F1. Saláty a rajčata byly sázeny ze sazenic zakoupených v obchodech.

Hlávkový salát je jednou z nejvíce konzumovaných listových zelenin v syrovém stavu. V roce 2016 byla roční celosvětová produkce salátů a čekanky téměř 26,8 mil. tun vypěstovaných na 1,2 mil. ha půdy. (FAO, 2016). Hlávkový salát je řazen mezi rostliny citlivé na těžké kovy (Zubillaga and Lavado, 2002; Zhao et al., 2012; Gattullo et al., 2017).

Rajčata jsou po bramborách druhou nejdůležitější zeleninou na světě. V roce 2016 byla roční celosvětová produkce 177 mil. tun vypěstovaných na téměř 4,8 mil. ha půdy. (FAO, 2016).

2.4.4. Nádobové pokusy pro pěstování vybraných druhů zeleniny

Nádobové pokusy byly navrženy s využitím stejných 5 litrových plastových květináčů s povrchovou plochou 31 cm² (obrázek 2.3). Všechny sady byly umístěny ve stejné lokalitě, ve stejných podmínkách. U každé varianty půdní směsi byla připravena dvě (pokusy 2015) nebo tři opakování (pokusy 2016). Půdní směsi byly voleny tak, aby zahrnovaly srovnávací směsi – úrodnou zahradní zeminu (černozem – oblast Hustopečsko) a erodovanou polní zeminu (černozem – oblast Hustopečsko), a dále směsi erodovaných zemin s komposty.

Zeminy a komposty byly před plněním do nádob homogenizovány promícháním a následně byly odebrány podíly do jednotlivých nádob. Materiály byly připraveny v bezdeštném období s následujícími vlhkostmi: pokus 2015 - zeminy cca 94 % sušiny, komposty cca 73 % sušiny; pokus 2016 - zeminy cca 94 % sušiny, komposty cca 74 % sušiny.

Směsi erodované polní zeminy s komposty byly připraveny tak, že podíl kompostu odpovídal teoretické polní dávce 80 tun kompostu na hektar. Po přepočtu se jednalo o 260 g do jedné pětilitrové nádoby. Množství zeminy do směsí vážilo cca 3 kg. Podíl kompostu ve směsi tak odpovídal cca 8 %. Kompost byl promíchán se zeminou vždy jednotlivě při plnění každé nádoby.



Obr. 2.3. Příprava a průběh nádobových pokusů

2.4.5. Závlaha rostlin v nádobách

Hlavním zdrojem vody pro rostliny byly srážky. Rostliny byly v případě potřeby doplňkově zavlažovány studniční vodou. Složení srážkových vod bylo ověřeno sérií 12 odběrů v období 2014 – 2015. Na začátku pokusů byl také proveden rozbor podzemní vody ze studny a ze zásobníku, v němž byla tato voda akumulována před použitím k závlaze.

2.4.6. Zpracování a analýza vzorků zeleniny

Sklizeň salátů probíhala po cca 1 měsíci od vysazení sazenic (květen) v době plné zralosti salátových hlávek před jejich přechodem do fáze tvorby květů.

Rostliny rajčat byly vysazeny v termínech stejných jako saláty. Sklizeň plodů rajčat probíhala od prvního výskytu zrajících plodů (červenec) do konce produkce zrajících plodů (září – říjen).

Vzorky salátu byly usušeny při pokojové teplotě, jemně rozdrceny a zhomogenizovány. Sklizené plody rajčat byly váženy v čerstvém stavu a ukládány do mrazáku. Na konci sklizně byly všechny plody z dané rostliny smíchány, zpracovány v laboratoři na homogenní směs a lyofilizovány k odběru podílů vzorků k analýzám.

2.4.7. Posouzení fytotoxicity kompostů pomocí řeřichového testu

K posouzení toxicity organických a anorganických sloučenin v substrátech je možné použít test klíčivosti semen a měření délky kořínků (Di Salvatore et al., 2008). V České republice je podobný přístup zahrnut v používaném testu fytotoxicity - tzv. „Řeřichový test“, což je metoda vyhodnocování intenzity rozkladu organických materiálů a zralosti výsledného kompostu. Jde o biologickou metodu hodnocení fytotoxicity výluhu vzorku indexem klíčivosti citlivé rostliny - řeřichy seté (*Lepidium sativum*). (Hejátková et al., 2007)

Ze sady kompostů založených v roce 2015 a připravených z odpadů ČOV Dražovice byly v roce 2016 odebrány vzorky kompostů K-MČ bez preparátu a K-MČ-P s preparátem. Vzorky kompostů byly již stabilizované, nevykazovaly změny v mikrobiální kontaminaci a obsahu sledovaných prvků.

Následně byly z odebraných vzorků kompostů připraveny vodné výluhy dle Hejátkové et al. (2007) a kontrolní vzorek (semena klíčící pouze na destilované vodě) pro testy fytotoxicity na semenech řeřichy. Množství destilované vody k přípravě vodných výluhů kompostů (ml), bylo určeno jako násobek sušiny ve vzorku, a to 5 až 10 x sušina (%).

Pro každý vzorek bylo použito 10 Petriho misek s 8 semeny, celkem tedy 80 semen. Po 24 hodinách byl v každé Petriho misce zjištěn počet vyklíčených semen a změřeny délky všech kořínků.

2.4.8. Vyhodnocení výsledků

Většina tabulek uvedená ve výsledcích je rozdělena na dvě části. Toto rozdělení vychází z klasifikace biogenních prvků dle Richtera (2004), kdy v první tabulce jsou uvedeni zástupci makroelementů (N, P, K, Ca, Mg), mikroelementů (Fe, Mn) a tzv. užitečných prvků (Al, Mn) – požadavek na ně je specifický dle druhu rostliny. Ve druhé tabulce jsou uvedeny cizorodé prvky, které jsou obsaženy v rostlinách jako důsledek zvýšeného přirozeného obohacení nebo pod vlivem antropogenní činnosti (Cd, Cr, Pb, As, Ni) a dva zástupci mikroelementů (Cu, Zn) s ohledem na jejich potenciální nebezpečí při jejich nadměrné aplikaci. Pro prvky uvedené ve druhé tabulce jsou stanoveny také limity v příslušných vyhláškách, které byly využity pro hodnocení kontaminace potenciálních vstupních materiálů do směsí kompostů a materiálů pro nádobové pokusy.

Základní statistické charakteristiky (průměr, medián, minimum, maximum a směrodatná odchylka) datových sad byly počítány v programu Microsoft Excel.

Pro posouzení statistické významnosti rozdílů mezi obsahem nutrientů a sledovaných prvků v konzumních částech salátu (listy) a rajčete (plody) při různém substrátu v nádobách byla použita analýza rozptylu ANOVA (ANalysis Of VAriance).

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1. Využití kalů zeměmi EU

V současné době většina zemí EU zakazuje likvidaci nezpracovaného kalu v půdě. Některé země požadují speciální úpravu kalů před jejich opětovným použitím (biologická nebo chemická stabilizace), zatímco existuje několik zemí, které umožňují používání neošetřených kalů za určitých definovaných podmínek (např. Francie, Švédsko a Estonsko). V několika zemích je zakázáno použití kalů také v lesích, lesnictví, dolech a na zelených plochách. (Kelessidis a Stasinakis, 2012) V České republice jsou kaly aplikovány na půdu přímo nebo jsou před aplikací upravovány kompostováním, dále jsou využívány k rekultivacím, úpravám terénu a okrajové jsou stále skládkovány.

Již několik let je snahou Evropské unie opět sjednotit přístup ke zpracování kalů. V posledním dokumentu Společného výzkumného střediska (JRC) „End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals“ je surový kal vyloučen ze skupiny „bioodpadů“, tj. surovin pro přípravu tzv. „end-of-waste“ kompostů. (Saveyn a Eder, 2014; Mininni et al., 2015). Cíle zpracování surového kalu jsou v současnosti jejich minimalizace, celková stabilizace a hygienizace procesy tepelné hydrolýzy následované anaerobní digescí a spalování v peci s fluidním ložem. Navzdory tomu je navrhováno ponechat kal jako potenciální vstupní materiál pro přípravu tzv. „end-of-waste“ kompostů. Toto rozhodnutí je ovlivněno skutečností, že mnoho členských států jako např. Estonsko, Finsko, Francie, Itálie, Litva, Německo a Španělsko produkuje velké množství kompostů s obsahem kalu. (Mininni et al., 2015)

Množství produkovaného a zpracovaného kalu v EU a rozčlenění podle jednotlivých technologií likvidace kalů v letech 2014 a 2015 dle Eurostatu (Eurostat, 2016), v České republice dle Českého statistického úřadu (ČSÚ, 2016) je uvedeno v tabulce 3.1. Z důvodu nízkého počtu zemí, které reportovaly údaje (2014 – 18 zemí, 2015 – 14 zemí) je v tabulce 3.2 uveden přehled také z let 2012 a 2013 (Eurostat, 2016; ČSÚ, 2015). K největším producentům kalů v Evropě patří Francie, Německo (tabulky 3.1 a 3.2), Španělsko, Velká Británie (tabulka 3.2) a Itálie. Nejběžnější metodou konečné likvidace kalů v zemích EU-15 v letech 2014 a 2015 bylo spalování (47,3 %, 61,5 %), následované opětovným využitím kalů v zemědělství a při kompostování (48,2 %, 38,2 %). V některých členských státech EU-13 ("nové" členské státy, které vstoupily do EU po roce 2004) bylo ještě v roce 2014 a 2015 nejvíce rozšířenou metodou skládkování (tabulka 3.1): na Maltě (100 % v obou letech), v Chorvatsku (94,5 %, 94,7 %) a Rumunsku (75,5 %, 66,9 %).

Tab. 3.1. Množství produkovaného a zpracovaného kalu v EU (v tisících tun sušiny) a rozčlenění podle jednotlivých technologií zpracování kalů v letech 2014 a 2015 dle Eurostatu (Eurostat, 2016), v České republice dle Českého statistického úřadu (ČSÚ, 2016).

Stát	celková produkce kalů		celková likvidace kalů		metody likvidace kalů										
	2014	2015	2014	2015	využití v zemědělství		kompostování a jiné aplikace		skládkování		spalování		jiné		
					2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	
Belgie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bulharsko	54,9	57,4	32,6	47,2	16,4	30,4	0,8	3,4	8,5	8,5	0	0	7,0	4,8	
Česká republika	159,2	173,0	159,2	173,0	47,8	63,1	60,5	67,1	5,2	6,5	3,4	2,2	42,2	34,2	
Dánsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Estonsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Finsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Francie	961,5	-	937,1	-	421,3	-	305,1	-	31,1	-	170,6	-	8,9	-	
Chorvatsko	16,3	17,9	16,3	17,1	0,8	1,0	0,008	0	15,4	16,2	0	0	0,083	0,001	
Irsko	53,5	58,4	53,5	58,4	42,5	46,7	9,3	10,9	0,4	0,1	0	0	1,4	0,7	
Itálie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kypr	6,2	6,7	6,2	6,7	1,4	0,9	0	0	0	0	0	0	4,8	5,8	
Litva	40,7	42,9	34,4	37,3	8,5	11,2	14,6	15,6	0	0	0	0	11,2	10,4	
Lotyšsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lucembursko	-	9,2	-	9,2	-	3,1	-	2,2	-	-	-	0,8	-	3,0	
Maďarsko	166,5	156,9	112,4	111,0	4,7	9,4	74,7	83,7	5,3	5,1	22,8	12,7	0	0	
Malta	8,5	8,4	8,5	8,4	0	0	0	0	8,5	8,4	0	0	0	0	
Německo	1837,1	1820,6	1803,0	1803,0	470,9	427,7	251,5	223,7	0	0	1077,9	1148,7	2,6	3,0	
Nizozemí	344,2	-	319,7	-	0	-	0	-	0	-	319,7	-	0	-	
Polsko	556,0	568,0	556,0	568,0	107,2	107,5	46,3	47,1	31,5	40,5	84,2	79,3	286,7	293,6	
Portugalsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Rakousko	239,0	-	239,0	-	39,6	-	77,7	-	3,2	-	118,5	-	0	-	
Rumunsko	192,3	210,5	192,3	155,8	13,1	10,6	0,2	-	145,1	104,2	1,2	0,5	32,7	40,9	
Řecko	116,1	-	116,1	-	22,8	-	9,0	-	39,0	-	38,5	-	6,8	-	
Slovensko	56,9	56,2	56,9	56,2	0	0	26,1	24,9	4,3	4,6	16,0	16,9	10,5	9,8	
Slovinsko	28,3	29,1	28,0	29,0	0,2	0	1,5	0,6	0,3	0,2	15,0	15,1	11,0	13,0	
Španělsko	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Švédsko	200,5	197,5	183,9	-	51,0	59,5	59,1	-	3,6	-	2,2	-	68,1	-	
Velká Británie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

- = hodnoty nejsou dostupné

Tab. 3.2. Množství produkovaného a zpracovaného kalu v EU (v tisících tun sušiny) a rozčlenění podle jednotlivých technologií zpracování kalů v letech 2012 a 2013 dle Eurostatu (Eurostat, 2016), v České republice dle Českého statistického úřadu (ČSÚ, 2015).

Stát	celková produkce kalů		celková likvidace kalů		metody likvidace kalů										
	2012	2013	2012	2013	využití v zemědělství		kompostování a jiné aplikace		skládkování		spalování		jiné		
					2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	
Belgie	157,2	-	107,3	0	18,5	-	-	-	-	-	-	88,8	-	-	-
Bulharsko	59,3	60,3	41,8	30,2	21,2	16,7	5,5	2,3	6,6	10,5	0	0	8,4	0,8	
Česká republika	168,2	154,3	168,2	154,3	51,9	54,7	53,2	50,4	9,3	7,1	3,5	3,2	50,2	38,8	
Dánsko	141	-	114,9	-	74	-	-	-	1,4	-	33,8	-	5,6	-	
Estonsko	21,7	18,8	21,7	18,8	0,5	0,3	14,8	16,3	6,5	1,8	-	-	-	-	
Finsko	141,2	-	141,2	-	7,1	-	92,8	-	9,7	-	31,7	-	0	-	
Francie	987,2	886,5	932,3	869,7	683,9	368,6	-	287,5	40,2	30,9	207,1	160,6	1,1	22,1	
Chorvatsko	42,1	32,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Irsko	72,4	64,6	72,4	64,6	68,3	52	4,1	9,3	0	2,9	0	0	0	0,3	
Itálie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kypr	6,5	-	6,5	-	2,8	-	0	-	0	-	0	-	3,8	-	
Litva	45,1	-	18,2	-	6,3	-	11,9	-	0	-	0	-	0	-	
Lotyšsko	20,1	22,8	18,1	20,7	7,5	7,5	2,1	2,3	0,2	0,2	0	0	8,3	10,7	
Lucembursko	7,7	-	4,7	-	3,6	-	-	-	0	-	0,7	-	0,5	-	
Maďarsko	161,7	166,5	157,7	132,1	15,1	11	90,2	93,3	26,3	12,5	24,1	14,1	2	1,2	
Malta	10,4	9,6	10,4	9,6	0	0	0	0	10,4	9,6	0	0	0	0	
Německo	1848,9	1815,5	1844,4	1794,7	542	491,3	293,5	264,4	0	0	1008,8	1034,8	0	4,2	
Nizozemí	346,4	-	324,6	-	0	-	0	-	0	-	321,1	-	3,5	-	
Polsko	533,3	540,3	533,3	540,3	115	105,4	33,3	32,6	46,8	31,4	56,6	72,9	281,6	298	
Portugalsko	338,8	-	113,1	-	101,6	-	-	-	11,4	-	0,1	-	-	-	
Rakousko	266,3	-	266,3	-	39,9	-	74,2	-	13,6	-	138,6	-	-	-	
Rumunsko	85,4	172,8	48,4	172,4	2,2	8	1,3	0,3	43	117,7	0,4	-	1,4	46,5	
Řecko	118,6	-	118,6	-	14,2	-	0	-	40,3	-	39,4	-	24,8	-	
Slovensko	58,71	57,43	58,71	57,43	1,25	0,52	36,83	35,21	7,81	6,64	3,2	5,01	9,62	10,05	
Slovinsko	26,1	27,3	25,7	27	0	0	1,9	2,7	1,1	0,5	13	14,4	9,7	9,4	
Španělsko	2756,6	-	2577,2	-	1921,7	-	-	-	383,9	-	100,5	-	171,2	-	
Švédsko	207,5	-	195,9	-	48,3	-	66,7	-	7,1	-	1,5	-	72,3	-	
Velká Británie	1136,7	-	1078,4	-	844,4	-	-	-	4,7	-	228,9	-	0,4	-	

- = hodnoty nejsou dostupné

V Itálii se v současné době celková produkce kompostu odhaduje na 1 milion tun/rok a 0,3 milionu tun/rok kompostu s obsahem kalu. Okolo 450 000 tun/rok odvodněných kalů (10-15 % z celkové produkce kalů) je kompostováno. (Mininni et al., 2015) Na základě údajů Eurostatu by měly mít největší podíl na produkci kompostu s obsahem kalu Německo a Francie. Obecně, čistírenský kal tvoří jednu až dvě třetiny vstupních materiálů pro přípravu kompostu s obsahem kalu, dalšími vstupními položkami jsou zelený odpad a biologický odpad (Saveyn a Eder, 2014). Podle Evropské federace pro zemědělskou recyklaci (EFAR), je asi 25 % produkce čistírenských kalů ve Francii kompostováno společně se zeleným odpadem. Norma NF U44-095 (AFNOR, 2002) platná od května 2002 ve Francii stanovila produktová kritéria čistírenských kalů, která umožňují rozvoj dobře strukturovaného trhu pro tento druh půdního hnojiva. (Saveyn a Eder, 2014)

I přes to, že Německo patří k největším producentům kalů a produkuje velké množství kompostů s obsahem kalů, prošla v Německu 18. ledna 2017 vládou nová vyhláška o čistírenských kálech, která podstatně snižuje konvenční využití čistírenských kalů na zemědělské půdě za účelem dalšího snížení znečišťujících látek vstupů do půdy. Po uplynutí přechodného období (12 a 15 let) bude možná aplikace kalů na zemědělskou půdu pouze z čistíren do 50 000 EO a to za zprísňených podmínek. (BMUB, 2017; Stránský, 2017) Hlavním cílem návrhu vyhlášky je získat cenné složky čistírenských kalů jako je fosfor a následně je využít v rámci oběhového hospodářství. Do 12 let od vstupu vyhlášky v platnost musejí všechny německé ČOV nad 100 000 EO získávat fosfor z kalů a 15 let poté, co vstoupí vyhláška v platnost také ČOV nad 50 000 EO. Výjimku tvoří čistírenské kaly s obsahem fosforu nižším než 2 %. Nařízení neukládá žádnou konkrétní technologii pro obnovu fosforu, ale ponechává dostatek prostoru pro využití nebo rozvoj inovačních metod obnovy. (BMUB, 2017; Stránský, 2017)

Obdobně Rakousko zveřejnilo 11. ledna 2017 návrh „Federálního plánu odpadového hospodářství 2017“ a zahájilo proces účasti veřejnosti. (BMLFUW, 2017; Stránský, 2017) Z hlediska strategie pro budoucí nakládání s čistírenskými kaly, která je součástí plánu, je významně omezeno zemědělské využití čistírenských kalů. Během přechodného období 10 let má být ukončena přímá aplikace kalů na půdu a jejich kompostování z čistíren odpadních vod s projektovanou kapacitou větší nebo rovnou 20 000 EO. (BMLFUW, 2017; Stránský, 2017)

Součástí strategie je také povinnost recyklace fosforu z kalů z čistíren odpadních vod s projektovanou kapacitou větší nebo rovnou 20 000 EO, které by mělo být dosaženo u ČOV nad 500 000 EO přímo na místě, pokud je obsah fosforu vyšší než 2 % nebo monospalováním

čistírenských kalů a následném získávání fosforu z popela spálených kalů. (BMLFUW, 2017; Stránský, 2017)

Průzkum kalů z 82 čistíren odpadních vod provedený v roce 2015 v České republice ukázal, že limity pro Cu, Ni, As a Cr nebyly splněny v 7,3 %, 4,9 %, 3,6 % a 3,6 % vzorků v daném pořadí. Žádný vzorek nepřekročil limitní hodnotu 0,6 µg/kg sušiny obsahu sumy šesti kongenerů PCB. Také limitní hodnota pro obsah AOX nebyla v žádném vzorku překročena. V ČR došlo od poloviny devadesátých let, kdy jsou k dispozici výsledky rozborů kalů, k výraznému snížení obsahů kadmia, rtuti, olova a zinku.

V období 2005 – 2016 bylo v České republice v průměru 39,8 % čistírenských kalů využito při kompostování, 31,1 % v zemědělství a při rekultivacích, 5,7 % skládkováno, 1,3 % spalováno a 22,6 % zpracováno jiným způsobem.

3.2. Využití materiálů z malých ČOV pro přípravu kompostů

Jak vyplývá z dlouhodobých sledování kalů z objektů mechanického předčištění kořenových ČOV, nepřekračuje jejich kontaminace rizikovými prvky a látkami až na výjimky hodnoty dané vyhláškou č. 437/2016 Sb. pro použití kalů v zemědělství (tabulka 3.3).

Téměř všechny sledované vzorky však nevyhovovaly mikrobiologickým kritériím pro termotolerantní koliformní bakterie a enterokoky daným vyhláškou. Mikrobiální znečištění kalů je poměrně proměnlivé v závislosti na míře stabilizace. Pro dosažení větší stability kalů a snížení případné kontaminace by bylo dobré více sledovat probíhající procesy, případně zvolit mezistupeň stabilizace kalů před jejich použitím v zemědělství. V případě KČOV se jeví i anaerobní vyhnívání v štěrbínové usazovací nádrži jako nedostatečné respektive s proměnlivou mírou stabilizace. Podobné zkušenosti ze zahraničí uvádí např. Oleszkiewicz a Mavinic (2001) a Uggetti et al. (2010). Jednou z možností stabilizace kalů je kompostování (Uggetti et al., 2010; Nielsen a Willoughby, 2005). Tento proces přináší pozitivní změny vstupních materiálů a snižuje jejich kontaminaci.

Možnost uplatnění kalů z malých ČOV v zemědělství závisí na dohodě mezi jejími provozovateli a zemědělsky hospodařícími subjekty. V obdobích, kdy není zájem ze strany těchto subjektů o kaly, je nutné jejich vyvážení na jiné komunální ČOV s kalovým hospodářstvím, což je i pro provozovatele finančně náročnější.

Tab. 3.3. Obsah rizikových prvků a sloučenin ve vzorcích kalů sledovaných ČOV (hodnoty uvedeny jako min – max v mg/kg sušiny)

Parametr	Dražovice (12) kal z mechanického předčištění	Hostětín (3) kal z mechanického předčištění	Starovice (2) kal odvodněný	Limitní hodnoty (vyhláška č. 437/2016 Sb.)
As	5,5 – 9,4	3,5 – 13,8	1,9 – 2,4	30
Cd	0,14 – 1,31	0,48 – 0,88	0,41 – 0,50	5
Cr	31,6 – 76,3	38,9 – 52,3	16,7 – 17,1	200
Cu	62,3 – 586	168 – 265	99,7 – 158	500
Hg	0,05 – 0,67	0,42 – 0,55	0,38 – 0,49	4
Ni	24,4 – 35,9	11,4 – 27,5	14,0 – 15,8	100
Pb	17,8 – 54,8	20,4 – 42,8	8,5 – 10,6	200
Zn	165 – 1440	620 – 1030	452 – 520	2500
AOX	10 – 160	59	–	500
PCB	0,01 – 0,28	–	–	0,6

U námi sledovaných čistíren do 1 000 EO byly zjištěny rozdíly v obsahu tří základních živin (v % sušiny). Nejvyšší obsah byl zjištěn u mechanicko-biologické čistírny ve Starovicích ($N_{\text{celk.}} = 5,8 \%$, $P_{\text{celk.}} = 1,9 - 2,9 \%$ a $K = 0,5 - 0,8\%$), jejíž kal obsahoval také nejvyšší podíl organických látek ($Z\check{Z} = 75 - 85 \%$).

Naopak u kalů z usazovacích nádrží KČOV v Hostětíně i Dražovicích byl obsah organických látek výrazně nižší (KČOV Dražovice – $Z\check{Z} = 19 - 42 \%$, KČOV Hostětín – $Z\check{Z} = 29 - 35 \%$).

Důvodem je pravděpodobně napojení na jednotné kanalizační sítě na rozdíl od starovické ČOV. Také obsahy celkového dusíku a celkového fosforu byly výrazně nižší a rozkolísané (KČOV Dražovice - $N_{\text{celk.}} = 0,3 - 2,1 \%$, $P_{\text{celk.}} = 0,3 - 0,8 \%$ a $K = 0,2 - 0,8\%$; KČOV Hostětín - $N_{\text{celk.}} = 1,2 - 2,0 \%$, $P_{\text{celk.}} = 0,4 \%$ a $K = 0,3 - 0,6 \%$).

Uggetti et al. (2010) publikovali následující procentní poměr tří hlavních živin v čistírenském kalu čistírny odpadních vod (ČOV) pro 1 500 PE - $N_{\text{celk.}} = 9,76 \%$, $P_{\text{celk.}} = 2,68 \%$ a $K = 0,27 \%$. Singh a Agrawal (2008) publikovali souhrnné hodnoty z průzkumů v Thajsku, Španělsku a Indii. Rozsahy celkového obsahu dusíku, celkového obsahu fosforu a draslíku v procentech se výrazně neměnily a pohybovaly se v rozmezí hodnot $N_{\text{celk.}} = 2,5 - 3,4 \%$, $P_{\text{celk.}} = 1,06 - 1,34 \%$ a $K = 0,2 - 0,42 \%$. Gascó a Lobo (2008) uvádějí množství $N_{\text{celk.}}$ v odpadním kalu $1,5 \%$ a množství $P_{\text{celk.}}$ $1,2 \text{ g/kg}$.

Obsah rizikových prvků ve vzorcích kalů ze tří sledovaných septiků domovních kořenových čistíren byl při odběrech v letech 2012 a 2015 následující: $2 - 4 \text{ mg/kg As}$,

1 – 1,5 mg/kg Cd, 8 – 43 mg/kg Cr, 128 – 251 mg/kg Cu, 0,3 – 0,6 mg/kg Hg, 10 – 28 mg/kg Ni, 8 – 17 mg/kg Pb, 550 – 1300 mg/kg Zn. U žádného z kalů nedošlo k překročení limitní hodnoty obsahu rizikových prvků dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.

Vzorky měly sušinu 3 – 6 % a ztrátu žiháním 60 – 85 %. Obsah dusíku byl v rozmezí 20 – 34 g/kg sušiny a obsah fosforu 5 – 14 g/kg sušiny. Složením tedy kaly ze septiků prakticky řádově odpovídají složení kalů z balených ČOV kategorie do 10 EO. Mikrobiální znečištění se pohybovalo v rozmezí 2×10^3 až $4,2 \times 10^3$ KTJ/g sušiny vzorků v případě enterokoků a $1,6 \times 10^4$ až 6×10^4 KTJ/g sušiny vzorků v případě termotolerantních koliformních bakterií a došlo tak překročení limitních hodnot dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. Je tedy nutné kaly odvážet k další stabilizaci a snížení mikrobiální kontaminace.

Kaly ze septiků domovních kořenových ČOV nebyly od zahájení jejich provozu (roky 2010 a 2011) prozatím vyváženy. Kaly z balených ČOV jsou vyváženy obvykle dodavateli ČOV k dalšímu zpracování v rámci kalového hospodářství větších komunálních ČOV.

Další sledované materiály (sedimenty biologických a retenčních nádrží, filtrační materiály kořenových filtrů a vegetace umělých mokřadů) nebyly z hlediska dalšího využití problematické.

Jedním z těchto odpadních materiálů, u nichž lze zvažovat využití v zemědělství nebo při péči o zeleň jsou sedimenty biologických nádrží, často s pobřežními litorálními zónami, nebo majícími charakter umělých mokřadů s povrchovým tokem. V rámci práce proběhlo opakované sledování rozložení a mocnosti sedimentů v nádržích navazujících na kořenové filtry ČOV Dražovice a ČOV Hostětín. Při průzkumech byly odebrány vzorky sedimentů pro analýzu obsahu organického podílu, nutrientů, dalších elementů a rizikových prvků a pro analýzu mikrobiální kontaminace. K porovnání vývoje mocnosti sedimentů byla využita starší měření provedená ve VÚV TGM, v.v.i. (2006 v Hostětíně, 2010 v Dražovicích).

V roce 2010 byl po deseti letech provozu proveden průzkum sedimentů v nádrži ČOV Dražovice. Mocnost sedimentů byla zjištěna v rozmezí 0 až 30 cm a byla ovlivněna evidentně prouděním vody od přítokového potrubí směrem k výusti. Nejvyšší množství usazeného materiálu bylo při březích (ovlivněno zřejmě i opadem listů z blízkých dřevin) a v prostoru u odtokového objektu. Ve většině plochy nádrže bylo množství usazeného materiálu do mocnosti 10 cm. Opakované průzkumy nádrže, prováděné v letech 2012 a 2013 ukázaly obdobné hodnoty, maximální mocnost sedimentu dosáhla cca 40 cm v prostoru břehové linie a odtokové části. Na většině plochy nádrže mimo odtokovou část a břehové linie do šířky cca 1 až 2 metry byla mocnost sedimentu do 10 cm. Zdrojem nerozpuštěných látek byly

do roku 2010 i ojedinělé poruchy nátokového potrubí a přísun části vody bohaté na nerozpuštěné látky (koncentrace až desítky mg/l) přímo z mechanického předčištění. Díky pravidelné údržbě a kontrolám k těmto závadám v následujících letech nedošlo a zdrojem nerozpuštěných látek je tak zbytkové znečištění z kořenových polí (obvykle do 5 mg/l) a zejména biomasa fytoplanktonu a opadu listů z dřevin v okolí nádrže.

Obdobný průzkum nádrže ČOV Hostětín byl proveden v roce 2006, také po deseti letech provozu. Mocnost sedimentů se zvyšovala od strany s přítokovým potrubím po stranu s odtokovým objektem. Mocnosti černých, organických, anaerobních sedimentů až do výše 30 cm byly zjištěny pouze v bezprostředním okolí odtokového objektu. Ve zbytku nádrže sedimenty nebyly přítomny vůbec, nebo v rozmezí 5 až 10 cm, plynule přecházející do podložní jílové vrstvy. Během průzkumů v roce 2013 bylo prostorové rozmístění sedimentů a jejich mocnost stejné, maximální mocnost byla měřena u odtokového objektu a dosahovala až 50 cm. Také u této lokality je zdrojem nerozpuštěných látek (a tvorby sedimentu) zejména biomasa z okolní vegetace a částečně biomasa z rozvoje fytoplanktonu. Přísun nerozpuštěných látek z kořenových filtrů se pohybuje obvykle do 5 mg/l.

Vliv plovoucí makrofytní vegetace (okřehky apod.) na zvyšování mocnosti sedimentů jejím rozkladem nepředstavuje u obou nádrží významný problém, neboť tato vegetace je přítomna okrajově, v důsledku proudění a mísení vody.

Kontaminace sedimentů biologických nádrží nepřekračuje limity pro rizikové prvky s ohledem na jejich využití v zemědělství (tabulky 3.4 a 3.5). Úbytek obsahu rizikových prvků mezi sedimenty usazovacích a dočišťovacích nádrží zřejmě souvisí také s jejich akumulací z protékající vody do vegetace kořenových filtrů (Švehla et al., 2008). Kröpfelová (2011) a další autoři potvrdili vysoké účinnosti akumulace těžkých kovů do vegetace. Mikrobiální kontaminace byla zjištěna v přítokových částech obou nádrží. Sedimenty odtokových částí nebyly mikrobiologicky zatížené (tabulky 3.4 a 3.5). Zjištěné hodnoty umožňují odtěžení nezávadných sedimentů odtokových částí a přímé využití aplikací na zemědělskou půdu a zvýšit tak retenční prostor, dobu zdržení a účinnost nádrží odtěžením nezávadných sedimentů odtokových částí.

Tab. 3.4. Obsah rizikových prvků a mikrobiálního znečištění ve vzorcích sedimentů z dočišťovací nádrže Dražovice (hodnoty uvedeny v mg/kg sušiny, enterokoky a termotolerantní koliformní bakterie v KTJ/g sušiny jako min–max / průměr–směrodatná odchylka)

Ukazatel	Dražovice sediment z BN přítoková část	Dražovice sediment z BN odtoková část	Přípustné limity dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.
As	3,9–17,8 / 10,6–3,3	5,4–9,8 / 7,0–1,4	30
Cd	0,18–0,46 / 0,34–0,09	0,13–0,41 / 0,24–0,09	5
Cr	21,2–100 / 53,1–16,9	35,2–63,1 / 47,6–7,1	200
Cu	33,2–217 / 92,5–44,9	15,2–131 / 56,9–34,9	500
Hg	0,05–0,22 / 0,13–0,06	0,05–0,13 / 0,08–0,02	4
Ni	19,9–44,0 / 35,2–6,7	21,1–38,0 / 30,9–5,1	100
Pb	11,5–26,4 / 19,7–3,50	2,4–21,5 / 17,1–5,0	200
Zn	140–606 / 317–141	108–385 / 179–80	2500
Enterokoky	300– 3480 / 1182 –955	0–307 / 91–97	< 1000
FC	0– 6580 / 1994 –1898	0–633 / 330–250	< 1000

Vysvětlivky:

FC – termotolerantní koliformní bakterie (fekální bakterie)

Tab. 3.5. Obsah rizikových prvků a mikrobiálního znečištění ve vzorcích sedimentů z dočišťovací nádrže Hostětín (hodnoty uvedeny v mg/kg sušiny, enterokoky a termotolerantní koliformní bakterie v KTJ/g sušiny jako min–max / průměr–směrodatná odchylka)

Ukazatel	Hostětín sediment z BN přítoková část	Hostětín sediment z BN odtoková část	Přípustné limity dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.
As	4,6–11,6 / 8,4–2,2	4,6–13,9 / 7,1–2,7	30
Cd	0,15–0,56 / 0,35–0,11	0,20–0,48 / 0,30–0,09	5
Cr	33,9–63,9 / 43,7–8,9	26,6–56,0 / 42,9–9,3	200
Cu	14,5–100 / 50,5–20,0	14,2–66,8 / 41,2–17,4	500
Hg	0,07–0,27 / 0,14–0,06	0,06–0,17 / 0,10–0,04	4
Ni	23,7–61,4 / 34,1–10,6	25,3–38,0 / 30,1–3,9	100
Pb	7,9–18,2 / 13,5–3,1	9,1–24,4 / 16,6–4,4	200
Zn	97–349 / 194–81	62–246 / 135–70	2500
Enterokoky	0–870 / 121–267	0–0 / 0–0	< 1000
FC	0– 8890 / 2158 –3096	0–385 / 66–121	< 1000

Vysvětlivky:

FC – termotolerantní koliformní bakterie (fekální bakterie)

Změny filtračních vlastností materiálů kořenových filtrů vlivem kolmatace podrobně zkoumala např. Hyánková (2005), Švehla et al. (2008) a Suchý et al. (2009). Autoři uvádí změny pórovitosti a hydraulické vodivosti filtračních materiálů v důsledku kolmatace v čase. Procentní podíl kalu v sušině filtračního materiálu se pohyboval v jednotkách procent. V částech kořenových filtrů několika ČOV nejvíce zasažených kolmatací byly zjištěny

hodnoty 10 až 16 % kalu v sušině materiálu. Se vzdáleností od nátoků vod do kořenových filtrů podíl kalu klesal, a to u všech ČOV sledovaných v mnoha studiích výše uvedenými autory. Tyto poznatky potvrzují také průzkumy filtračních materiálů kořenových filtrů ČOV Dražovice.

Výskyt kalů na povrchu kořenových filtrů souvisí s jejich vyplavováním při hydraulickém přetížení ČOV a nebo s jejich bytněním a vyplouváním k hladině, odkud jsou vodou unášeny dále na filtry, v případě, že v usazovacím prostoru nejsou dostatečně navržené normé stěny. Vyplavování kalů je u šterbinových nádrží spojeno zřejmě s tím, že nejsou dostatečně přístupné šterbiny (také v důsledku bakteriálních nárůstů) a dochází k usazování kalů v prostoru nad šterbinami, odkud jsou následně vyplavovány, nebo unikají při bytněním. U jiných typů nádrží a u septiků je příčinou nevhodný návrh konstrukcí objektů, nebo obtížné a nedostatečné odkalování pozorované u nádrží s bočními vyhnívacími komorami, kdy je kal přepouštěn do komor ode dna.

Na obrázcích 3.1 a 3.2 je znázorněno měření mocnosti usazenin na povrchu prvního a třetího kořenového filtru. Vzdálenost na ose Y (vertikální osa) představuje vzdálenost od nátokového potrubí uloženého ve směru osy X (horizontální osa).

D/Š (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
2	0	8	16	14	27	20	18	16	13	14	12	15	16	17	12	28	23	27	30	24	20
6	12	10	20	11	16	15	20	8	11	6	11	12	12	11	12	16	22	17	18	20	20
12	5	4	4	8	14	8	4	5	8	5	4	6	8	5	8	10	12	14	14	14	8
18	4	6	10	8	8	4	2	4	6	8	8	6	4	4	8	4	6	12	12	10	10
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.1. Mocnost usazenin (v cm) na povrchu prvního kořenového filtru ČOV Dražovice v roce 2012. Nátok vody do potrubí probíhá v bodě 0/40 (D/Š).

D/Š (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
0	25	20	45	45	35	20	25	32	30	27	25	20	18	14	14	14	14	16	18	12	12	16	14	17
2	40	35	40	35	20	20	30	20	20	20	15	15	15	10	10	10	10	8	10	8	12	12	5	12
4	20	20	22	20	25	15	20	10	10	10	20	15	10	5	8	2	2	5	5	8	10	10	2	5
6	10	20	28	26	22	15	16	10	12	10	12	16	4	4	7	2	2	2	2	4	4	2	2	2
8	10	10	16	20	18	12	10	6	10	8	8	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	8	12	12	14	14	8	6	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	8	10	12	14	10	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	4	8	8	10	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	4	4	8	6	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	2	4	4	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.2. Mocnost usazenin (v cm) na povrchu třetího kořenového filtru ČOV Dražovice v roce 2012. Nátok vody do potrubí probíhá v bodě 0/0 (D/Š).

Na obrázku 3.4 je patrný významný pokles mocnosti usazenin na povrchu třetího filtru již ve vzdálenosti 2 m od rozvodného nátokového potrubí, tedy ve vzdálenosti 5 % z filtrační délky, a to mimo oblast vtoku. Také je patrná příčná distribuce usazenin od vtoku vody do potrubí a filtru (v levé části obrázku). Usazeniny jsou akumulovány zejména v oblasti vtoku vody, kde byly zaměřeny ještě ve vzdálenosti 16 metrů, tj. do poloviny filtrační délky (obrázek 3.4). Z porovnání obou obrázků je zřejmé, že první filtr byl zatěžován vnosem uniklých kalových částic více než třetí filtr. Mocnost usazenin na povrchu tohoto filtru byla zjištěna výrazně větší, dosahující prakticky po celé šířce filtru až do vzdálenosti 18 metrů. Důvodem je i nerovnoměrné rozdělení průtoků na jednotlivé filtry v rozdělovací šachtici, v níž byl realizován nevhodný způsob rozdělení pomocí krátkých obdélníkových přelivů z dřevěných dluží.

Množství rizikových prvků ve vzorcích z kořenových filtrů ČOV Dražovice ve frakci pod 0,063 mm nepřekračuje limitní hodnoty dané vyhláškou o použití kalů v zemědělství a všechny zjištěné údaje odpovídají složení vzorků kalu z let 2006 až 2012 odebraných z usazovací nádrže.

Rozpětí mikrobiálního zatížení termotolerantními koliformními bakteriemi kolmatovaných materiálů bylo ve srovnání s kaly z mechanického předčištění až o řád vyšší, obsah byl v rozpětí $4,4 \times 10^4 - 1 \times 10^6$ KTJ/g sušiny, zatímco obsah enterokoků $7,6 \times 10^3 - 9 \times 10^5$ KTJ/g sušiny téměř odpovídal jejich obsahu v kalech z mechanického předčištění. Předpokládáno bylo nižší mikrobiologické zatížení díky částečné stabilizaci na povrchu. Důvodem vyššího znečištění může být trvalý přísun odpadní vody a částic kalu z usazovací nádrže.

Dalším odpadem produkovaným provozem kořenových čistíren odpadních vod je biomasa makrofytní vegetace, kterou jsou osázeny kořenové filtry. Výsledky rozborů vzorků biomasy rákosu (*Phragmites australis*) a chrastice (*Phalaris arundinacea*), tedy dvou základních druhů využívaných při realizaci kořenových ČOV v České republice, uvádí podrobně Vymazal et al. (2007), Vymazal et al. (2009) a Březinová (2015). Pokud se porovnají výsledky analýz rákosu z Dražovic, z Hostětína a ze Křtin s výsledky uvedenými v poslední jmenované práci, zahrnující i obsáhlou rešerši množství rizikových prvků v rákosu obecném ve světě, vyplývá, že množství chromu, kadmia, niklu, olova a zinku se pohybuje ve stejných rozmezích hodnot. Obsahy chromu a olova jsou podobně jako u vzorků z čistíren sledovaných v citované práci na dolní hranici rozpětí hodnot publikovaných celosvětově. Důvodem je i to, že přítoky zmíněných čistíren nejsou zatíženy průmyslovými odpadními vodami. Obsahy mědi v rákosu tří uvedených čistíren odpovídají dolní polovině rozpětí

udávaného v práci Březinové (2015). Obsah rtuti, arsenu a hliníku byl porovnán s výsledky výzkumu publikovanému v práci Kröpfelové (2011). Obsah rtuti byl zjištěn srovnatelný pro obě komunální ČOV s průměrem pro několik srovnatelných čistíren z českých krajů uvedeným v dané práci (0,012 mg/kg sušiny). V případě domovní ČOV ve Křtinách byl cca 4x vyšší, ale stále nízko nad mezí stanovitelnosti. Obsah arsenu byl srovnatelný, i pro tuto KČOV, a stejně jako v uvedené práci na úrovni meze stanovitelnosti. Kröpfelová (2011) publikovala průměrný obsah hliníku 94,3 mg/kg sušiny, čemuž se blíží hodnota pro dražovickou čistírnu (86 mg/kg sušiny). V Hostětíně a ve Křtinách byl vypočítán průměrný obsah pod 50 mg/kg sušiny.

Vymazal et al. (2010) porovnávali změny biomasy rákosu a chrastice rostoucích na kořenových filtrech a akumulaci prvků v jejich biomase v závislosti na počtu sklizní v roce. U některých prvků zjistili vyšší kumulaci za rok při opakované sklizni (Al, Cd a Zn z prvků sledovaných v této práci). Naopak pro As, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni a Pb platilo, že vyšší akumulace byla při jedné sklizni, což může znamenat, že jsou do nadzemní sečené biomasy transportovány v pozdější fázi růstu (Březinová, 2015).

Obecně platí, že vegetace sklizená z povrchu kořenových filtrů anebo z umělých mokřadů jiných typů je použitelná jako vstupní materiál pro kompostové směsi bez rizika vnosu významného množství těžkých kovů a arsenu v porovnání s obsahy těchto prvků v kalech.

3.3. Složení a kontaminace použitých kompostů

V tabulce 3.6 jsou uvedeny hodnoty nutrientů a vybraných prvků, sušiny a ztráty žíháním v použitých kompostech v době aplikace v nádobových pokusech. Obsah organických látek u kompostů byl vyšší ve srovnání s erodovanou zemínou použitou v roce 2015 (EZ-2015) v kompostu 1 K-MČ o 66 %, v kompostu 1 K-KF o 83 %, v kompostu 2 K-KF o 58 %. Obsah celkového dusíku o 88 %, 93 % a 89 % a celkového fosforu o 84 %, 89 % a 85 %. Ve srovnání se zahradní zemínou (ZZ-2015) byly rozdíly nižší, ne však významně (ZŽ = 50 %, 75 %, 58 %, $N_{\text{celk.}}$ = 82 %, 90 % a 80 %, $P_{\text{celk.}}$ = 80 %, 86 % a 82 %.

V roce 2016 byla situace obdobná. Obsah organických látek u kompostů byl vyšší ve srovnání s erodovanou zemínou použitou v roce 2016 (EZ-2016) v kompostu K-MČ o 57 %, a v kompostu K-MČ-P o 67 %. Obsah celkového fosforu o 98 % u obou kompostů. Celkový dusík nebyl v erodované půdě ani v kompostech K-MČ a K-MČ-P stanoven.

Nejvyšší množství celkového dusíku, celkového fosforu a organických látek z kompostů použitých pro nádobové pokusy v roce 2015 (1 K-MČ, 1 K-KF a 2 K-KF) obsahoval jednoletý kompost z kořenového filtru (1 K-KF).

Tab. 3.6. Obsah, nutrientů, vybraných prvků, sušiny a ztráty žiháním (v mg/kg sušiny) v kompostech v době aplikace v nádobových pokusech.

Ukazatel	1 K-MČ	1 K-KF	2 K-KF	K-MČ	K-MČ-P
N	11,2	20,5	13,2	-	-
P	5,5	8,0	6,1	2,7	2,8
K	4,3	8,4	10,6	11,8	13,4
Na	0,27	1,0	0,45	0,59	1,9
Ca	32,6	40,2	26,4	33,1	9,2
Mg	6,31	9,8	9,9	30,3	9,5
Fe	16,8	21,8	28,7	26,2	25,9
Mn	0,41	0,41	0,49	0,49	0,43
Al	36,3	50,5	55,9	36,2	36,4
Sušina	78	73	69	76,7	72,0
Ztráta žiháním	11	22	13	14,3	18,3

1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění s aplikací startovacího preparátu

Z kompostů, použitých v roce 2015, byla ve všech třech kompostech (1 K-KF, 1 K-MČ a 2 K-KF) překročena jak navržená limitní hodnota pro Cu v rámci EU, tak i hodnoty dané národní normou. V kompostech 1 K-KF a 2 K-KF byly zjištěny také obě nadlimitní hodnoty pro Zn a v kompostu 1 K-MČ nadlimitní hodnota dle ČSN 46 5735 (tabulka 3.7).

V kompostech K-MČ a K-MČ-P použitých v roce 2016 nebyla nepřekročena žádná z limitních hodnot navržených v rámci EU a daných normou ČSN 46 5735. Nižší koncentrace mědi a zinku v těchto kalech (průměrně 218 mg/kg zinku a 65,9 mg/kg Cu oproti hodnotám 1016 mg/kg Zn a 386 mg/kg Cu v roce 2015) byly pravděpodobně způsobeny nižším podílem použitých kalů ve vstupní směsi pro kompostování (tabulka 3.7).

Zatížení kalů může být ovlivněno napojením ČOV na kombinovaný kanalizační systém, který přináší i smyvy srážkových vod bohatých na tyto kovy v důsledku koroze střešních materiálů.

Tab. 3.7. Obsah rizikových prvků a mikrobiálního znečištění (hodnoty uvedeny v mg/kg sušiny, enterokoky a termotolerantní koliformní bakterie (v KTJ/g sušiny) v kompostech v době aplikace v nádobových pokusech.

Ukazatel	1 K-MČ	1 K-KF	2 K-KF	K-MČ	K-MČ-P	Navržené hodnoty v rámci EU ^a	ČSN 46 5735 ^b
As	4,19	7,12	7,92	6,53	5,76		10
Cd	0,36	0,88	0,66	0,34	0,29	1,5	2
Cr	44	75	84	42,7	46,6	100	100
Cu	270	529	361	65,1	66,6	200	100
Hg	0,41	0,52	0,41	0,095	0,087	1	1
Ni	21,3	33,2	35,9	23,8	23,2	50	50
Pb	22,4	43,7	39,8	17,3	21	120	100
Zn	577	1275	1195	200	235	600	300
Enterokoky	14	0	44	0	0		
FC	141	0	389	0	0		

^aSaveyn and Eder, 2014

^bČNI, 1991

1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění s aplikací startovacího preparátu
FC – termotolerantní koliformní bakterie (fekální bakterie)

3.4. Testy fytoxicity vybraných směsí kompostů

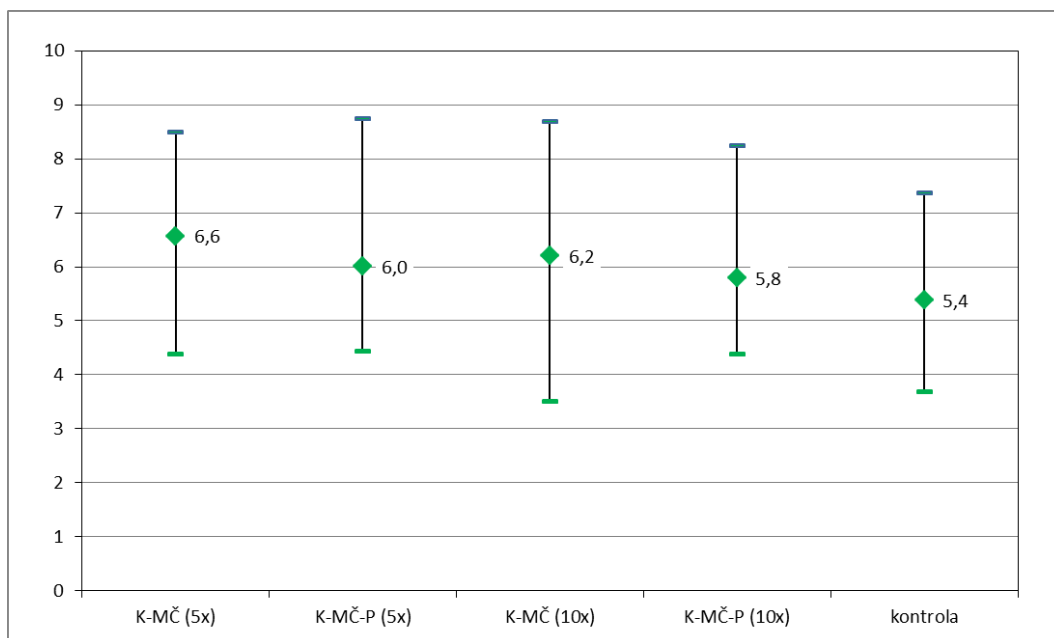
V tabulce 3.8 jsou uvedeny základní statistické charakteristiky souborů měření pro jednotlivé připravené směsi (K-MČ (5x), K-MČ-P (5x), K-MČ (10x), K-MČ-P (10x)) a kontrolní sadu. Průměrná klíčivost byla 7,5 – 7,8 semen z 10. Z analýzy ANOVA vyšlo, že nelze zamítnout nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot směsí a kontrolní sady na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Rozdíl mezi sadami byl tedy statisticky nevýznamný.

Na obrázku 3.3 je zobrazení rozptylu délek kořínků mezi minimálními a maximálními hodnotami a zobrazení průměrných hodnot vždy z měření klíčků 8 semen řeřichy v 10ti opakováních. Větších průměrných délek dosáhly klíčky na kompostové směsi K-MČ než K-MČ-P. Nejmenší průměrnou délku dosáhly klíčky z kontrolní sady.

Tab. 3.8. Základní statistické charakteristiky pro klíčivost rostlin

Název vzorku (ředění)	průměrná klíčivost	rozptyl	průměrná délka kořínků (mm)	rozptyl	index klíčivosti (%)	kategorie kompostu dle indexu klíčivosti (IK)
K-MČ (5x)	7,5	0,28	6,6	1,96	118	I. kategorie - substráty pro zahradnictví, květinářství
K-MČ-P (5x)	7,7	0,46	6	1,67	110	I. kategorie - substráty pro zahradnictví, květinářství
K-MČ (10x)	7,5	0,50	6,2	2,52	110	I. kategorie - substráty pro zahradnictví, květinářství
K-MČ-P (10x)	7,8	0,18	5,8	1,49	107	I. kategorie - substráty pro zahradnictví, květinářství
kontrola	7,8	0,18	5,4	1,04		

K-MČ (5x)- jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu (5x ředění), K-MČ-P (5x) jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění s aplikací startovacího preparátu (5x ředění), K-MČ (10x)- jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu (10x ředění), K-MČ-P (10x) jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění s aplikací startovacího preparátu (10x ředění)



Obr. 3.3. Rozptyl délky kořínků klíčků řehy pro jednotlivé sady

3.5. Nádobové pokusy s plodinami

Zhou et al. (2016) zjistili zřetelné rozdíly v koncentracích těžkých kovů v jedlých částech různých druhů zeleniny pěstovaných na půdě kontaminované těžkými kovy (Pb, Cd, Cu, Zn a As). Koncentrace těžkých kovů klesaly následovně: listová zelenina > stonková zelenina / kořenová zelenina / plodová zelenina > lusková zelenina / melounová zelenina. Schopnost listové zeleniny přijímat a hromadit těžké kovy byla nejvyšší a melounové zeleniny nejnižší. Toto zjištění potvrzuje i porovnání užitkových částí obou sledovaných plodin z nádobových pokusů.

V salátu rostoucím na kyselých půdách bylo zjištěno následující pořadí toxicity Cd > Ni > Cu > Zn (Haghighi et al., 2010).

Zhao et al. (2012) provedli nádobový pokus za účelem zkoumání vlivu kompostovaného kalu z čištění odpadních vod (KKOV) aplikovaného samostatně a ve směsi s chemickým hnojivem na růst a hromadění těžkých kovů v rostlinách listového salátu pěstovaných na dvou půdách („Xanthi-Udic Ferralosol“ (XFU) a „Typic Purpli-Udic Cambosol“ (TPUC)). Pokus zahrnoval kontrolu (hnojivo obsahující dusík-fosfor-draslík (NPK)); kompostovaný kal aplikovaný v poměru 27,54 (KKOV), 82,62 (3KKOV), 165,24 (6KKOV) t/ha; a směs kompostovaného kalu a chemického hnojiva (1/2 KKOV + 1/2 NPK). Aplikací dávky byly stanoveny dle místních doporučených dávek. Aplikace KKOV zvýšila biomasu salátů, ale také obsah mědi, zinku a olova v salátech a v půdě celkové kovy a kovy extrahované pomocí dietyltriaminpentaoctové kyseliny (DTPA). KKOV při dávkách 27,54 a 82,62 t/ha navyšuje rostlinnou biomasu méně než samotné NPK hnojivo. Obsahy Cu, Zn, Pb a Cd v TPUC byly menší než limity půd třídy II Čínské normy ekologické jakosti půd GB15618-1995 (NSPRC, 1995), při dávce 165,24 t/ha, zatímco Cu a Cd v XUF překročily mezní hodnoty již při dávce KKOV 27,54 t/ha.

Jayasinghe (2012) provedl studii s cílem zhodnotit potenciální možnost použití KKOV jako alternativu finančně nákladné rašeliny pro kultivaci hlávkového salátu. Bylo připraveno pět variant s různým procentuálním zastoupením KKOV a rašeliny v růstovém substrátu. Procenta přídatku KKOV k rašelině byla 0 %, 15 %, 30 %, 50 % a 70 %. Růstová média KKOV + rašelina měla velmi dobré fyzikální a chemické vlastnosti a významné obsahy rostlinných živin, zejména P, K, Ca a Mg. Největší růstové přírůstky a výtěžnosti byly dosaženy v substrátu s 30 % KKOV a 70 % rašeliny z celkového objemu. Čerstvá hmotnost nadzemní části, sušina nadzemní části, čerstvá hmotnost kořenů a sušina kořene získané z růstového substrátu s 30% KKOV a 70 % rašeliny byly zvýšeny o 56,53 %, 43,93 %, 56,53 %, 43,93 %, 56,53 %, 43,93 %, 56,53 %, 43,93 %, 56,53 %, 43,93 %.

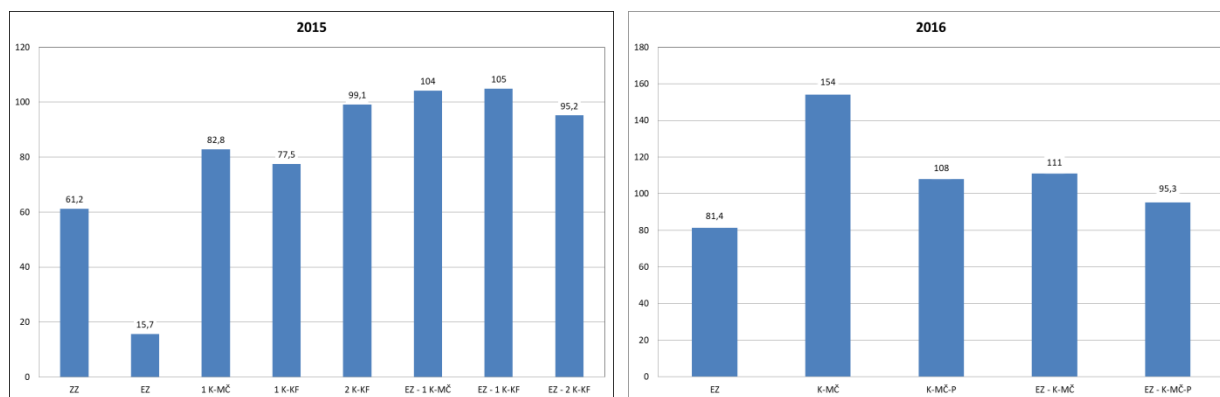
29,46 % a 67,24 % v porovnání s rašelinovým substrátem. Přidání CSS jako složky růstového média zvýšilo koncentrace živin (N, P, K, Mg, Ca, Cu, Mn, Zn a Pb) v rostlině salátu. Hladiny stopových prvků v tkáních však byly mnohem nižší než fyto toxické úrovně.

Substráty s přidavkem KKO V vykazovaly hodnoty pH a EC vyšší než čistá rašelina, což může představovat hlavní omezující faktory pro jejich použití jako růstového substrátu. Na druhé straně tato média nevyvolávají žádné snížení růstu rostlin ve srovnání s rašelinou. Kromě toho mohou být růstové substráty založené na KKO V považovány za náhradu rašeliny pro pěstování salátu kvůli jejich účinným fyzikálním a chemickým vlastnostem.

Gatullo et al. (2017) provedli pokus ve skleníku se čtyřmi kultivary hlávkového salátu, při kterém porovnávali kompostovaný komunální odpad s perlitem (KKO + perlit), kompostovaný kal s perlitem (KKO V + perlit) a rašelinu s perlitem (rašelina + perlit). Biometrické parametry rostlin naměřené po 72 dnech růstu ukázaly, že výtěžek rostlin kultivovaných na KKO V + perlit byl podobný kontrolním rostlinám, nezávisle na kultivaru. Naopak směs KKO + perlit všeobecně potlačila tvorbu biomasy, zejména u kultivarů Murai a Patagonia. V porovnání se směsí rašelina + perlit, oba kompostové substráty redukovaly akumulaci těžkých kovů v listech, s velkým účinkem u kultivaru Maximus. Množství Cd a Pb v jedlé části byla vždy pod limity stanovenými nařízením Komise (ES) č. 1881/2006 (European Commission, 2006).

V terénním experimentu de las Heras et al. (2005) ukázali významné zvýšení Al, Ni a Zn v listových salátech po třech letech od aplikace kalu. Dále aplikace vysokých dávek kalu (8 a 10 kg/m²) nepodporuje významný nárůst výnosu a několik těžkých kovů se začne hromadit v půdách. Je výhodné použít 4 nebo 6 kg/m² kalu po dobu nejvýše dvou let v řadě ve stejné půdě. Konečně je vždy nutné kontrolovat různé faktory: obsah těžkých kovů v kalu, pH půdy a obsah organických látek v půdách, aby se zabránilo toxickým hladinám těžkých kovů v rostlinných tkáních.

K nejvyššímu navýšení biomasy salátů v provedených nádobových pokusech, a to až o 85 % oproti erodované zemině přispěl 8 % přídavek kompostů z mechanického předčištění a kořenových filtrů do erodované zeminy v první sadě pokusu v roce 2015, kdy měla erodovaná zemina nízký obsah živin (obrázek 3.4). Současně došlo k navýšení živin (tabulka 3.9), ale také k nadlimitnímu výskytu rizikových prvků v půdě (tabulka 3.11).



ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidavkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

Obr. 3.4. Průměrné hmotnosti hlávek salátů pěstované v letech 2015 a 2016 (v gramech)

Průměrné hodnoty živin v salátech a rajčatech pěstovaných v roce 2015 a 2016 jsou uvedeny v tabulkách 3.9, 3.10, 3.13 a 3.14.

Tab. 3.9. Průměrné hodnoty živin v salátech pěstovaných v roce 2015 (v g/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	saláty					
	N celk.	P celk.	Na	K	Ca	Mg
ZZ	37,5	2,64	4,96	64,5	20,9	7,64
EZ	29,7	2,27	2,93	43,9	10,7	4,15
1 K-MČ	40,4	5,20	4,26	59,0	10,0	4,57
1 K-KF	40,0	3,78	6,38	67,0	20,2	7,96
2 K-KF	37,4	3,15	4,24	54,8	10,4	5,81
EZ - 1 K-MČ	34,1	2,91	7,09	36,7	13,5	7,63
EZ - 1 K-KF	35,5	3,78	4,50	39,5	8,7	4,90
EZ - 2 K-KF	34,9	2,49	6,81	58,7	18,1	9,03

ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

Tab. 3.10. Průměrné hodnoty živin v salátech pěstovaných v roce 2016 (v g/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	saláty					
	N celk.	P celk.	Na	K	Ca	Mg
EZ	22,8	3,73	2,01	59,6	12,6	4,63
K-MČ*	36,8	4,81	2,34	51,3	12,5	5,44
K-MČ-P	40,3	5,43	7,29	58,6	9,87	4,95
EZ-K-MČ	26,3	3,78	2,07	55,4	11,5	3,99
EZ-K-MČ-P	28,6	3,81	2,67	61,7	10,5	3,76

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přídatkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přídatkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

* - hodnota z jedné rostliny salátu

Zatížení užitkových částí plodin těžkými kovy a arsenem bylo hodnoceno dle Nařízení Komise (ES) č. 1881/2006 (European Commission, 2006) stanovující limity 0,2 mg/kg Cd, 0,3 mg/kg Pb a národního předpisu - vyhlášky č. 53/2002 Sb., stanovující limity (v mg/kg čerstvé hmoty): 0,5 As, 0,2 Cd, 0,2 Cr, 10 Cu, 50 Fe, 0,03 Hg, 2,5 Ni, 0,3 Pb, 25 Zn. Vyhláška byla z důvodu vstupu do Evropského společenství zrušena k 1. 8. 2004. Stále však umožňuje posoudit a porovnat míru kontaminace pro více kovů než uvádí Nařízení komise, kde jsou limity stanoveny pouze pro kadmium a olovo.

K překročení limitních hodnot u všech salátů včetně salátů pěstovaných v erodovaných zeminách a v roce 2015 i zahradní zemině došlo u chromu a železa a v roce 2015 také u zinku. Limitní hodnoty pro kadmium byly překročeny ve vzorcích z nádobového pokusu 2015 s výjimkou obou vzorků s kompostem 1 K-MČ, jednoho vzorku s kompostem 2 K-KF a jednoho vzorku směsi EZ – 1 K-KF a ve vzorcích z nádobového pokusu 2016 s výjimkou kompostových směsí. Důvodem byl vyšší obsah Cd v zemině. Sporadicky byly překročeny také limity pro rtuť a nikl. Průměrné hodnoty kovů a arsenu v salátech pěstovaných v roce 2015 a 2016 jsou uvedeny v tabulkách 3.11 a 3.12.

Tab. 3.11. Průměrné hodnoty kovů a arsenu v salátech pěstovaných v roce 2015 (v mg/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
ZZ	204	0,181	0,883	0,801	3,88	215	0,032	37,5	1,57	0,090	48,0
EZ	120	0,138	0,431	0,268	5,80	127	0,019	30,7	1,30	0,069	50,5
1 K-MČ	90,1	0,180	0,126	0,487	9,41	123	0,018	4,51	1,89	0,090	107
1 K-KF	156	0,181	0,398	0,680	7,75	161	0,021	18,4	1,30	0,091	193
2 K-KF	105	0,180	0,207	0,446	7,97	185	0,010	4,51	0,700	0,090	151
EZ - 1 K-MČ	185	0,182	0,337	0,570	6,85	159	0,012	28,1	2,13	0,091	92,9
EZ - 1 K-KF	116	0,184	0,197	0,463	7,59	139	0,014	12,2	0,669	0,092	66,2
EZ - 2 K-KF	189	0,184	0,460	0,534	5,74	200	0,012	29,8	1,34	0,092	88,9

ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

Tab. 3.12. Průměrné hodnoty kovů a arsenu v salátech pěstovaných v roce 2016 (v mg/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
EZ	153	0,182	0,758	0,677	6,40	144	0,022	52,4	2,84	0,091	41,6
K-MČ*	228	0,179	0,150	0,753	6,88	246	0,015	20,7	1,90	0,090	83,4
K-MČ-P	147	0,180	0,163	0,613	6,87	165	0,040	32,0	1,81	0,090	77,2
EZ - K-MČ	132	0,183	0,658	0,627	6,77	134	0,069	37,8	1,89	0,128	42,2
EZ - K-MČ-P	215	0,181	0,715	0,764	8,45	301	0,036	44,6	4,43	0,090	74,4

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidavkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

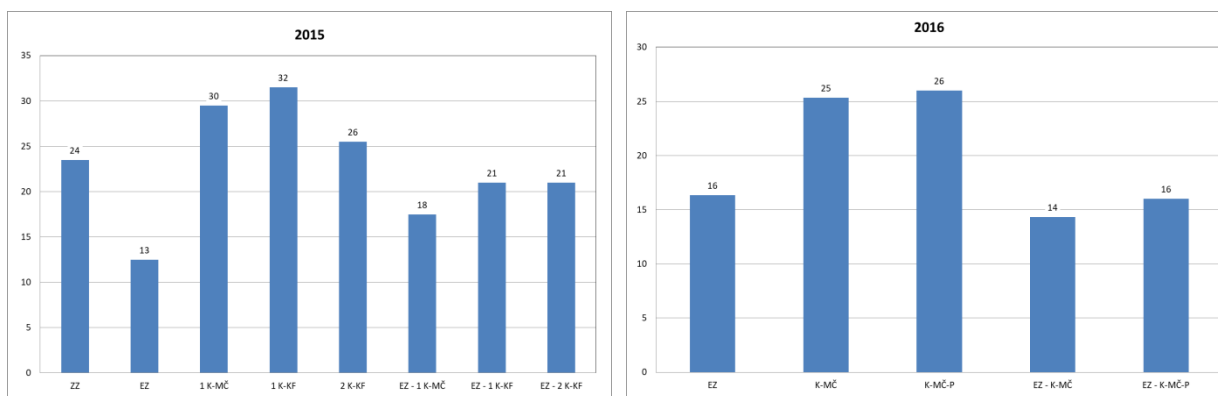
* - hodnota z jedné rostliny salátu

Moral et al. (2002) provedli plní pokus, v rámci kterého pěstovali rajčata na půdě obohacené kalem, půdě hnojené NPK hnojivem a půdě neošetřené. Na půdách obohacených přidavkem kalů bylo ve srovnání s půdou s anorganickým hnojením zjištěno vyšší množství kadmia obsaženého v nadzemní části rajčat. Akumulace Cd v plodech byla ve srovnání s ostatními analyzovanými částmi rostlin nízká a očividně se nelišila v závislosti na druhu půdy. Množství Cd v plodech rajčat bylo o řád nižší než v listech.

Elloumi et al. (2016) posuzovali také dostupnost kovů a jejich akumulaci v rajčatech při zvyšujícím se přidavku kalu do půdy. Výsledky ukázaly, že se pH půdy snížilo, zatímco zasolení, množství organického uhlíku, celkový dusík, dostupný fosfor a reaktivní formy Na, Ca, K a těžkých kovů se významně navýšily se zvyšujícími se aplikačními dávkami kalu. Ze tří těžkých kovů Zn, Cu a Cr, měl Zn největší schopnost přenosu z půdy do rostlin. Byla

pozorována nízká translokace kovů z kořenů do listů. Dávka 7,5 % kalu snížila produkci biomasy a způsobila pokles obsahu chlorofylu a stomatální vodivosti. Použití dávků 2,5 až 5 % čistírenských kalů v zemědělství by bylo účinnou a finančně efektivní metodou pro obnovení úrodnosti půdy a řešením jak nakládat s odpady způsobem šetrným k životnímu prostředí.

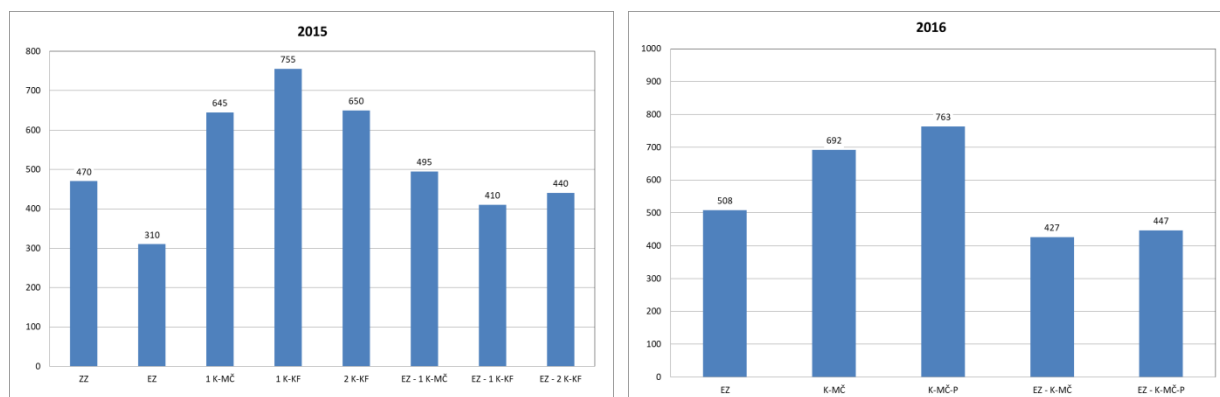
Nejvyšší výnosy u námi provedených pokusů byly zjištěny pro 100% kompostové směsi (průměrně 30 plodů z jedné rostliny). 8 % příměs kompostů do půdy nezpůsobila významné navýšení počtu plodů (obrázek 3.5). Nejvyšší hmotnost plodů dosáhla rajčata pěstovaná na kompostu 1 K-KF (obrázek 3.6), který obsahoval nejvyšší obsah organických látek a celkového fosforu. V plodech rajčat nebylo zjištěno překročení žádné z limitních hodnot daných příslušnými předpisy (tabulky 3.15 a 3.16).



ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidavkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

Obr. 3.5. Průměrné počty plodů rajčat pěstovaných v letech 2015 a 2016 (v kusech)



ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidavkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

Obr. 3.6. Průměrné hmotnosti plodů rajčat pěstovaných v letech 2015 a 2016 (v gramech)

Tab. 3.13. Průměrné hodnoty živin v rajčatech pěstovaných v roce 2015 (v g/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	rajčata					
	N celk.	P celk.	Na	K	Ca	Mg
ZZ	1,75	0,205	0,063	2,21	0,168	0,125
EZ	1,87	0,145	0,063	2,57	0,149	0,121
1 K-MČ	2,29	0,256	0,083	3,04	0,102	0,148
1 K-KF	1,96	0,284	0,079	2,26	0,100	0,150
2 K-KF	1,79	0,239	0,135	2,07	0,107	0,151
EZ - 1 K-MČ	1,76	0,149	0,099	2,00	0,159	0,124
EZ - 1 K-KF	2,06	0,213	0,093	1,83	0,110	0,121
EZ - 2 K-KF	1,92	0,154	0,181	2,48	0,117	0,123

ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidavkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

Tab. 3.14. Průměrné hodnoty živin v rajčatech pěstovaných v roce 2016 (v g/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	rajčata					
	N celk.	P celk.	Na	K	Ca	Mg
EZ	1,14	0,166	0,031	2,12	0,135	0,083
K-MČ	2,03	0,277	0,048	3,00	0,045	0,089
K-MČ-P	2,16	0,319	0,115	3,27	0,058	0,107
EZ-K-MČ	1,41	0,157	0,030	2,46	0,109	0,075
EZ-K-MČ-P	1,23	0,194	0,034	2,34	0,099	0,065

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidávkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidávkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

* - hodnota z jedné rostliny salátu

Tab. 3.15. Průměrné hodnoty kovů a arsenu v rajčatech pěstovaných v roce 2015 (v mg/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
ZZ	0,550	0,015	0,013	0,039	0,407	2,88	0,0001	0,550	0,055	0,007	1,50
EZ	0,620	0,017	0,014	0,062	0,580	2,71	0,0001	0,620	0,076	0,008	1,56
1 K-MČ	0,760	0,020	0,008	0,068	0,813	4,45	0,0001	0,760	0,103	0,010	3,08
1 K-KF	0,658	0,018	0,004	0,026	0,893	4,72	0,0001	0,981	0,035	0,015	3,22
2 K-KF	0,621	0,017	0,002	0,017	0,798	4,19	0,0001	0,621	0,102	0,008	3,04
EZ-1 K-MČ	0,518	0,014	0,006	0,022	0,588	4,10	0,0001	0,518	0,028	0,007	1,77
EZ-1 K-KF	0,602	0,038	0,003	0,024	0,656	4,11	0,0001	0,602	0,032	0,008	2,26
EZ-2 K-KF	0,552	0,015	0,001	0,015	0,653	2,83	0,0001	0,552	0,075	0,011	1,68

ZZ - zahradní zemina, EZ - erodovaná zemina, 1 K-MČ - jednoletý kompost založený s kalem z mechanického předčištění, 1 K-KF - jednoletý kompost založený s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, 2 K-KF - dvouletý kompost založený s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru, EZ - 1 K-MČ - erodovaná zemina s přidávkem jednoletého kompostu založeného s kalem z mechanického předčištění, EZ - 1 K-KF - erodovaná zemina s přidávkem jednoletého kompostu založeného s kalem usazeným na povrchu kořenových filtrů, EZ - 2 K-KF - erodovaná zemina s přidávkem dvouletého kompostu založeného s kalem z kolmatované svrchní vrstvy kořenového filtru

Tab. 3.16. Průměrné hodnoty kovů a arsenu v rajčatech pěstovaných v roce 2015 (v mg/kg čerstvé hmotnosti)

Půda	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
EZ	2,11	0,020	0,012	0,019	0,341	3,15	0,00005	0,755	0,028	0,012	1,28
K-MČ	3,59	0,018	0,002	0,018	0,484	4,20	0,00007	0,683	0,036	0,009	2,00
K-MČ-P	2,40	0,026	0,002	0,124	0,517	3,08	0,00005	0,989	0,038	0,009	2,11
EZ - K-MČ	3,26	0,021	0,009	0,314	0,367	4,30	0,00005	1,42	0,043	0,008	1,31
EZ - K-MČ-P	0,585	0,016	0,007	0,007	0,340	4,00	0,00007	0,832	0,088	0,008	1,44

EZ - erodovaná zemina, K-MČ - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV bez aplikace startovacího preparátu, K-MČ-P - jednoletý kompost s kalem z mechanického předčištění z ČOV a s aplikací startovacího preparátu, EZ-K-MČ - erodovaná zemina s přidávkem jednoletého kompostu s kalem z mechanického předčištění bez aplikace startovacího preparátu, EZ-K-MČ-P - erodovaná zemina s kalem z mechanického předčištění a s přidávkem jednoletého kompostu s aplikací startovacího preparátu

4. ZÁVĚR

Využití kalů v zemědělství je v současnosti Evropskou unií regulováno pouze limity těžkých kovů (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb a Zn) uvedenými ve Směrnici Rady 86/278/EHS. Jedná se o dokument více jak 30 let starý. Cílem směrnice bylo podpořit bezpečné používání čistírenských kalů v zemědělství tak, aby se zabránilo škodlivým účinkům na půdu a přeneseně na plodiny, živočichy a člověka.

V několika evropských zemích byly v porovnání se směrnicí přijaty přísnější právní předpisy a stanoveny limitní koncentrace i pro další těžké kovy. Nejrozšířenější je limit pro chrom.

Rozpětí limitů mezi členskými zeměmi je při porovnání národních legislativních předpisů pro tyto kovy značné, i o několik řádů. Pro kadmium jsou platné limity v rozmezí 0,7 až 40 mg/kg sušiny, pro měď 75 – 1750 mg/kg sušiny, pro rtuť 0,4 až 25 mg/kg sušiny, pro nikl 25 až 400 mg/kg sušiny, pro olovo 45 až 1200 mg/kg sušiny, pro zinek 200 – 4 000 mg/kg sušiny a pro chrom 70 – 1500 mg/kg sušiny.

Dále byly vymezeny mezní hodnoty pro některé syntetické organické sloučeniny, a to jak v Pracovním dokumentu o kalech z roku 2000 (European Commission, 2000b), tak v národních předpisech. Nejrozšířenější je limit pro AOX, který je stejný ve všech zemích, jež tento limit zavedly. Hodnota je 500 mg/kg sušiny kalu. Dalšími nejvíce uplatněnými limity jsou limity pro obsah PAU a PCB. Poslední skupinou znečištění, pro niž byly zavedeny limitní hodnoty, je mikrobiální znečištění. V Pracovním dokumentu o kalech z roku 2000 (European Commission, 2000b) jsou navrženy limity pro obsah salmonel a *Escherichia coli*. V národních předpisech (pouze 11ti zemí) jsou uváděny tyto ukazatele, nebo i enterokoky, termotolerantní koliformní bakterie, *Clostridium perfringens* či vajíčka helmintů.

Mimo limity pro kaly jsou legislativními předpisy definovány i limitní koncentrace těžkých kovů v půdách určených pro aplikaci kalů. V tomto případě nejsou rozdíly mezi hodnotami limitů při porovnání národních předpisů tak velké jako u kalů. Pohybují se v rozmezí maximálně jednoho řádu.

Ve 13 zemích EU, které poskytly údaje v obou letech 2014 a 2015, bylo v zemědělství využito 22,6 % (2014) a 22,1 % (2015) produkovaných kalů a 23,3 % (2014) 23,1 % (2015) kalů likvidovaných. Země EU používají širokou škálu technologií pro zpracování kalů, avšak převládajícími technologiemi jsou spalování (39,9 % v roce 2014 a 41,5 % likvidace kalů v roce 2015) a přímá aplikace v zemědělství a kompostování (39,2 % v roce 2014 a 38,6 % 2015 z likvidovaného kalu). Využívání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství je mezi

zeměmi EU velmi variabilní a pohybuje se mezi nulou (Malta, Slovinsko, Slovensko) a 80 % (Irsko). Vyšší procento využití kalů v zemědělství vykazovalo také Bulharsko (64 %). Z dat z roku 2012 také Portugalsko, Velká Británie, Španělsko, Lucembursko, Francie (nad 70 %) a také Dánsko a Bulharsko (nad 50 %), které v letech 2014 a 2015 data neposkytly nebo nebyla úplná.

Důležitou otázkou při podpoře aplikace kalů v zemědělství, po jejich stabilizaci přímo na půdu, anebo jako příměsi do kompostů, je posouzení možného negativního synergického působení na půdní organismy, rostliny, živočichy a člověka.

Testy fyto toxicity jsou cenné nástroje pro hodnocení aplikovatelnosti kalů na zemědělskou půdu. Testy toxicity existují ve formě směrnic významných organizací (např. US EPA, OECD, ISO, atd.). V ČR se tyto testy využívají při hodnocení ekotoxikologických vlastností vodních výluhů odpadů. Umožňují posoudit vliv spolupůsobení vnějších a vnitřních faktorů.

Problematika používání kalů v zemědělství je velice složitá a nese s sebou mnoho rizik. Vývoj společné evropské legislativy, stejně jako národních předpisů, je důležitý pro schopnost těmto rizikům předcházet. Je třeba mít taková bezpečnostní opatření, aby nedocházelo k možným únikům kontaminace do povrchových a podzemních vod, aby nedocházelo k toxickému působení na půdu, rostliny, živočichy a člověka.

Čistírenské kaly jsou druhem odpadu, který je produkován ve vysokém množství a je nositelem velkého množství cenných látek, které mohou být navráceny zpět do půdy i s možností snížení dopadu erozních jevů a deficitu organické složky v půdě.

I přesto, že mohou čistírenské kaly obsahovat široké spektrum škodlivých toxických látek, je důležité hledat nové cesty jejich zpracování.

Hlavní část disertační práce byla zaměřena na posouzení míry znečištění rizikovými prvky z odpadních materiálů pocházejících z malých čistíren (do 1 000 obyvatel), její změnu po zpracování kompostováním a přenos rizikových prvků do dvou vybraných zástupců zeleniny s různými užitkovými částmi (salát – listy, rajčata – plody).

Vybrané odpadní materiály z čistíren odpadních vod a umělých mokřadů byly odebrány a následně analyzovány z hlediska obsahu nutrientů, organických látek, vybraných prvků a mikrobiologického znečištění.

Bylo zjištěno, že odpady z procesu čištění vod nejsou zatíženy těžkými kovy a arsenem v takové míře, že by nebylo možné jejich přepracování a využití jako hnojiva v zemědělství nebo pro údržbu zelených ploch. Je však třeba jejich další úprava nutná ke snížení mikrobiologického znečištění.

Kaly byly společně s dalšími odpady kompostovány a následně samostatně nebo ve směsích s erodovanou půdou využity pro nádobové pokusy provedené v letech 2015 a 2016 se saláty a rajčaty.

Analýza hmotností hlávek vypěstovaných salátů přinesla tyto poznatky: velká rozkolísanost výnosů u nekvalitní erodované zeminy mezi oběma pokusy a značný přínos přidavku kompostů pro nárůst hmotnosti hlávek.

Z rozborů hlávek salátů však plyne, že došlo k překročení limitních hodnot některých rizikových prvků včetně těžkých kovů (Cr, Zn a Fe) u všech sledovaných směsí substrátů, Cd u většiny substrátu a Hg a Ni u některých substrátů. Přínos příměsí kompostů nebyl v roce 2016 s ohledem na vyšší kvalitu vstupní zeminy tak výrazný. Porovnání výnosů v nádobách s příměsí kompostů v obou letech je však porovnatelné a poměrně stabilní.

Pro zajištění vyššího výnosu plodů rajčat, je třeba zvýšit podíl kompostových substrátů při aplikaci do erodované zeminy na hranici zajišťující nezvýšení obsahu rizikových prvků v plodech nad limitní hodnoty.

V obou nádobových pokusech nebylo, na rozdíl od salátů, zjištěno překročení obsahu sledovaných rizikových prvků v žádné variantě se 100% kompostovými substráty ani s jejich příměsemi. V tomto případě tedy horní omezení podílu kompostů neplatilo.

Nádobovými pokusy bylo tedy zjištěno, že aplikace přepracovaných odpadních materiálů při pěstování vybraných plodin může znamenat nadlimitní zatížení těžkými kovy a arsenem u listové zeleniny, v našem případě salátů. U plodové zeleniny (rajčat) toto riziko prokázáno nebylo. Při aplikaci kompostů na půdu je třeba zohlednit také její vlastní zatížení.

Použití statistického nástroje ANOVA pro posouzení statistické významnosti rozdílů mezi obsahem nutrientů a těžkých kovů v konzumních částech salátu (listy) a rajčete (plody) při různém materiálu v nádobách se ukázalo jako vhodnější při počtu třech opakování. Dvě opakování, respektive nádoby pro každou variantu se jeví méně průkazné a výsledky analýzy jsou často ovlivněny odlehlostí obou hodnot z dané dvojice. To je patrné při srovnání analýzy ANOVA pro plody rajčat pěstovaných v nádobách se 100% náplní zeminou anebo kompostem z pokusu v roce 2016 (tři nádoby) a z pokusu v roce 2015 (dvě nádoby).

Kompostováním kalů a dalších odpadů z čistíren odpadních vod a z údržby zeleně by si mohly obce či jednotliví obyvatelé zajistit nejen jejich nízkonákladové zpracování, ale současně využít konečný produkt jako zdroj živin a organické hmoty do půdy, minimálně pro údržbu zelených ploch. Podobně by mohly být využity kaly a další odpady z domovních ČOV, kde navíc můžeme předem určit jejich potenciální znečištění.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- Alidadi, H., Najafpoor, A.A., Parvaresh, A., 2007: Determination of Carbon/Nitrogen Ratio and Heavy Metals in Bulking Agents Used for Sewage Composting. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 10, pp. 4180–4182.
- AFNOR – Norm'Info, 2002: Norme NF U44-095 Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux. France.
- BMLFUW, 2017: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Online:
<https://www.bmlfuw.gv.at/greentec/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017.html>.
Poslední přístup 10. 3. 2017.
- BMUB, 2017: Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety Online:
<http://www.bmub.bund.de/en/topics/water-waste-soil/waste-management/details-waste-management/artikel/sewage-sludge-ordinance-abfklaerv/>. Poslední přístup 10. 3. 2017.
- Březinová, T., 2015: Sezónní dynamika těžkých kovů ve vegetaci na kořenových čistírnách odpadních vod. Disertační práce, Praha, ČZU, pp. 117.
- ČSÚ, 2015: Statistická ročenka České republiky 2014 (Statistical Yearbook of the Czech Republic 2014). The Czech Statistical Office, pp. 799. ISBN 978-80-250-2638-0.
- ČSÚ, 2016: Statistická ročenka České republiky 2015 (Statistical Yearbook of the Czech Republic 2015). The Czech Statistical Office, pp. 824, ISBN 978-80-250-2726-4.
- Di Salvatore, M., Carafa, A.M., Carratù, G., 2008: Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates. *Chemosphere* 73, pp. 1461–1464.
- Elloumi, N., Belhaj, D., Jerbi, B., Zouari, M., Kallel, M., 2016: Effects of sewage sludge on bio-accumulation of heavy metals in tomato seedlings. *Spanish Journal of Agricultural Research* 14(4), pp. 1–13.
- European Commission, 2006: Commission regulation (EC) No. 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.
- Eurostat, 2016: Online:
<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00030&plugin=1>. Poslední přístup: 5. 12. 2016.
- FAO, 2016: Food Agriculture Organization, Faostat. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
Poslední přístup 10. 5. 2018.

- Gascó, G., Lobo, M.C., 2007: Composition of a Spanish sewage sludge and effects on treated soil and olive trees. *Waste Management* 27, pp. 1494–1500.
- Gattullo, C.E., Mininni, C., Parente, A., Montesano, F.F., Allegretta I., Terzano, R., 2017: Effects of municipal solid waste- and sewage sludge-compost-based growing media on the yield and heavy metal content of four lettuce cultivars. *Environ Sci Pollut Res* 24, pp. 25406–25415.
- Haghighi, M., M. Kafi, P. Fang and L. Gui-Xiao, 2010: Humic acid decreased hazardous of cadmium toxicity on lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Vegetable Crops Research Bulletin* 72, pp. 49–61.
- Hejátková, K., Dvorská, I., Jalovecký, J. Kohoutek, A., Kollárová, M., Mičánková, K., Plíva, P., Valentová, L., Vorlíček, Z., 2007: Kompostování přebytečné travní biomasy (Metodická pomůcka), (Composting of extra grass biomass (Methodological tool). ZERA – Zemědělská a ekologická regionální agentura, o.s., pp. 80. ISBN 80–903548–6–6.
- Heras de las, J., Mañas, P., Labrador J., 2005: Effects of Several Applications of Digested Sewage Sludge on Soil and Plants, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 40:2, 437-451.
- Jayasinghe, G.Y., 2012: Composted Sewage Sludge as an Alternative Potting Media for Lettuce Cultivation, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(22), pp. 2878–2887.
- Kelessidis, A., Stasinakis, A. S., 2012: Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* 32, pp. 1186–1195.
- Kröpfelová, L., 2011: Využití umělých mokřadů při čištění odpadních vod – eliminace živin a stopových prvků v KČOV. *Disertační práce*, Praha, ČZU, pp. 46.
- Mininni, G., Blanch, A.R., Lucena F., Berselli, S., 2015: EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environ Sci Pollut Res* 22, pp. 7361–7374.
- Moral, R., Cortés, A., Gomez, I., Mataix-Beneyto, J., 2002: Assessing changes in Cd phytoavailability to tomato in amended calcareous soils. *Bioresour. Technol.* 85, pp. 63–68.
- Nielsen, S., Willoughby, N., 2005: Sludge treatment and treatment wetlands systems in Denmark. *Water and Environmental Journal*, 19, pp. 296–305.

- Oleszkiewicz, J. A., Mavinic, D. S., 2001: Wastewater biosolids: An overview of processing, treatment and management. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, pp. 102–114.
- Plíva, P., Jelínek, A., Hejátková, K., 2002: Obecná podoba podnikové normy pro faremní kompost vyrobený kontrolovaným mikrobiálním procesem (The general form of the corporate standard for farming compost produced by a controlled microbial process). *Biom.cz* [online]. 2002-04-12. <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/obecna-podoba-podnikove-normy-pro-faremnikompost-vyrobeny-kontrolovanym-mikrobiálním-procesem>>. ISSN: 1801-2655. Poslední přístup 30. 7. 2018.
- Rao, N., Grethlein, H.E., Reddy, C.A., 1995: Effect of C/N ratio and moisture content on the composting of poplar wood. *Biotechnology Letters* 17(8), pp. 889–892.
- Richter, R., 2004: Multimediální učební texty z výživy rostlin. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU, Brno.
http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm. Poslední přístup 14. 8. 2018.
- Saveyn, H., Eder P., 2014: End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. European Commission EUR 26425 – Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies. EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online).
- Singh, R.P., Agrawal, M. 2008: Potencial benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28, pp. 347–358.
- Stránský, V., 2017: Kaly a sedimenty. Anketa. *Vodní hospodářství* 67(2), pp. 17–20.
- Švehla, J., Vymazal, J., Kröpfelová, L., Němcová, J., Bastl, J., Beránková, M., Suchý, V., 2008: Vybrané stopové prvky v sedimentech kořenových čistíren. In: *Sborník semináře Monitoring těžkých kovů a vybraných rizikových prvků při čištění odpadních vod v umělých mokřadech (GAČR 206/06/0058)*, Kröpfelová, L. a Vymazal, J. (Eds.), ENKI, Třeboň, pp. 69–77.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., Güell, D., García, J., 2010: Properties of Biosolids from Sludge Treatment Wetlands for Land Application. In: Vymazal, J. (ed). *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*. Springer, 2010, pp. 9–20, ISBN 978-90-481-9584-8.
- Vymazal, J., Švehla, J., Kröpfelová, L., Chrástný, V., 2007: Trace metals in *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* growing in constructed and natural wetlands. *Science of the Total Environment*, Vol. 380, pp. 154–162.

- Vymazal, J., Kröpfelová, L., Švehla, J., Chrástný, V., Štíhová, J., 2009: Trace elements in *Phragmites australis* growing in constructed wetlands for treatment of municipal wastewater. *Ecological Engineering*: 35, pp. 303–309.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., Švehla, J., Štíhová, J., 2010: Can multiple harvest of aboveground biomass enhance removal of trace elements in constructed wetlands receiving municipal sewage? *Ecological Engineering*: 36, 939–945.
- Zhao, X.L., Mu Z.J., Cao, C.M., Wang, D.Y., 2012: Growth and heavy-metal uptake by lettuce grown in soils applied with sewage sludge compost. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43: 1532–1541.
- Zhou, H., Yang, W.-T., Zhou, X., Liu, L, Gu, J.-F., Wang, W.-L., Zou, J.-L., Tian T., Peng P.-Q., Liao B.-H., 2016: Accumulation of Heavy Metals in Vegetable Species Planted in Contaminated Soils and the Health Risk Assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13(3), pp. 289.
- Zubillaga, M.S., Lavado, R.S., 2002: Heavy metal content in lettuce plants grown on biosolids compost. *Compost Sci Util* 10, pp. 363–367.