

Studie přínosu extenzivní stabilizace čistírenských kalů z malých komunálních zdrojů pro jejich využití jako hnojiva

JOSEF KRATINA, MILOŠ ROZKOŠNÝ, HANA HUDCOVÁ, MICHAL ŠEREŠ, ONDŘEJ HOLUBÍK

Klíčová slova: čistírenský kal – odvodnění kalu – stabilizace kalu – kvalita půdy – organická hmota – kompostování – hnojivo

SOUHRN

Článek je věnován prezentaci dílčích výsledků studie zaměřené na stanovení potenciálu využití extenzivní technologie odvodnění kalu pro malé komunální čistírny odpadních vod (ČOV, do 1 000 EO) v podmínkách ČR. Studie prokázala, že využití technologie založené na extenzivním odvodnění kalů a jejich stabilizaci v kalových polích s vhodnou mokřadní vegetací může představovat alternativu k jiným technologiím, zejména v kombinaci s kořenovými ČOV, které se vyznačují menší produkcí kalu. Podmínkou je dostatečně velká plocha pozemků, což je často příklad malých obcí, jež kořenové ČOV využívají. Popsaná technologie odvodnění čistírenských kalů může být prvním stupněm zpracování, které při zajištění následné vhodné úpravy a standardizace substrátů (přídatkem dalších přísad, následným zpracováním do peletek apod.) otevírá cestu pro racionální využití kalů pro zvýšení kvality orné půdy. Předpokládáme, že aplikace organominerálních hnojiv do půdy bude mít vysoce pozitivní vliv nejen pro tvorbu stabilní půdní struktury, ale především téměř eliminuje riziko spojené s vyplavováním dusíku (N) a fosforu (P) do vod.

ÚVOD

V současné době celosvětově narůstá problém s likvidací odpadů. Jejich druhotné využití je proto víc než žádoucí. Palčivým problémem malých obcí, které potřebují vybudovat nebo rekonstruovat ČOV, je uplatnění upraveného kalu na obecní, popř. zemědělské půdě. Není výjimkou, že malým komunálním ČOV chybí tzv. kalová koncovka. Čistírenský kal je tak často s vysokými náklady odčerpáván a převážen do velké ČOV. Obecně přitom platí, že vhodný zemědělský podnik, pro který by upravený a stabilizovaný kal z ČOV mohl být hodnotným zdrojem organických látek a živin, tak nemá možnost tento materiál využít. V praxi se tudíž stále nedaří zhodnotit materiálové zdroje přímo v místě jejich vzniku a z dlouhodobého hlediska takto prosazovat základní principy nízkouhlíkové ekonomiky. Hlavním cílem pro reálné uplatnění kalů z ČOV je v budoucnu zabránit poškození půd, rostlin, zdraví zvířat i lidí. Z tohoto důvodu, s ohledem na látky přítomné nyní v kalech (např. organické mikropolutanty), je vhodné kaly dostatečně předupravit, nejen hygienizovat z důvodu eliminace nadlimitního mikrobiálního znečištění.

Správné využití kalů je pro půdu velmi podstatné, neboť upravený kal je bohatým zdrojem organické hmoty, základních živin (dusík, fosfor, draslík, vápník aj.) i stopových prvků. Při správné aplikaci kalu do půdy může významně přispět ke zlepšení fyzikálně-chemických i biologických vlastností půdy [1]. Při

vhodném poměru C/N dochází v půdě k biotransformaci primárních zdrojů organické hmoty na humus [2]. Formování humózních částic vede k vytvoření stabilní půdní struktury a k posílení retenčních a infiltračních schopností půdy, dále ke snížení rizika eroze a vylepšení vláhové bilance na pozemku apod. [3].

Cílem studie, jejíž výsledky přináší tento článek, bylo posoudit možnost zjednodušení postupů úpravy a stabilizace čistírenských kalů z malých komunálních zdrojů znečištění (ČOV do 1 000 EO) v místě jejich vzniku a jejich následné využití. Toto zjednodušení je založeno na využití extenzivního způsobu odvodnění a stabilizace kalů, a to se zohledněním ekonomické efektivnosti. Systém je navržen pro potřeby malých obcí, které nemají v místě čištění odpadních vod realizované kalové hospodářství, a musejí tak jinými způsoby řešit nakládání s čistírenskými kaly a organickým materiálem vzniklým při čištění odpadních vod. Jde o technologii tzv. rákosových kalových polí, nazývanou také reed bed (RB) technologie či reed bed jednotky [4, 5].

V rámci studie byla tato technologie testována v poloprovozu jak pro mechanicko-biologické (aktivační) ČOV do 1 000 EO (dále jako MBČOV), tak pro tzv. kořenovou ČOV (KČOV) stejné velikostní kategorie. V článku je detailně rozebrána varianta s KČOV, jež je v podstatě také založena na extenzivních čistících procesech, které probíhají ve vodním a mokřadním prostředí. Při prokázání dostatečné účinnosti by bylo možné uvažovat o využití této energeticky méně náročné kombinace ČOV + úprava kalů pro vhodná malá sídla.

METODIKA

Technologie RB jednotek je určena k pasivnímu odvodňování čistírenských kalů, a to přímo v místě jejich vzniku. Principem technologie je postupné dávkování surového čistírenského kalu pocházejícího z aktivačních nádrží mechanicko-biologických ČOV, případně z objektů mechanického předčištění vod (lapáky písku, septiky, usazovací nádrže různých typů) nebo kořenových ČOV, a jeho pozvolné odvodňování na základě filtrace skrze drenážní vrstvu a evapotranspiraci s pomocí vysázených mokřadních rostlin. Kal je dávkován v určitých periodách, přičemž v období mezi dávkováním dochází jak ke snížení vlhkosti kalu, tak k jeho pozvolné mineralizaci. Po naplnění kalového pole na provozní maximum je systém odstaven a nastává fáze mineralizace matrice a snížení objemu kalu, aby mohl být opětovně dávkován „čerstvý“ kal. Takto se postupně dosáhne maximální provozní kapacity kalového pole, které je nutno odstavit. Konečnou fází je stabilizace a do určité míry i hygienizace směsi kalu a rozložitelné biomasy mokřadních rostlin, po jejímž ukončení je možné směs odtěžit k využití. Časová náročnost celého cyklu plnění je několik let, dle zkušeností [4]

nejvýše však deset, v závislosti na projektovaném objemu. Takto upravená kalová pole jsou využívána prakticky celosvětově [6–8]. Celkový přehled k této technologii publikovali autoři studie věnované shrnutí konstrukčních zásad, návrhových parametrů a zjištění o účinnosti odvodnění kalů a jejich stabilizaci [9].

Vlastní studii předcházely dvouletý monitoring složení kalů (2017 a 2018), který probíhal na dvou pilotních lokalitách, a to na KČOV pro malou obec v okrese Vyškov (cca 900 obyvatel) a MBČOV v malé obci v okrese Břeclav (cca 1 000 obyvatel). Obě lokality byly využívány i pro experimenty spojené s kompostováním, úpravami vlastností kalů a odvodněním kalů RB jednotkami. Rozdíl mezi čistírnami nepředstavuje jen technologie čištění, ale i kanalizační síť. KČOV je napojena na jednotnou kanalizační síť obce, MBČOV na oddílnou splaškovou kanalizaci. To se odráží i ve složení odpadních vod a kalů.

Vzorky kalů a odvodněných kalových směsí byly odebírány časově jako bodové, ale prostorově smíšené. Pokud jde o MBČOV, zdrojem byla kalová sekce, konkrétně sběrná mobilní vana pro uložení odvodněného kalu, v případě KČOV pak sekce mechanického předčištění (vyhřívací prostor šterbinové usazovací nádrže). Každý vzorek byl umístěn do samostatné vzorkovnice z HDPE a v chladnu přepraven do laboratoře. V laboratoři byly vzorky homogenizovány, lyofilizovány a dále zpracovány k analýzám – stanovení sušiny, ztráty žíháním, nutrientů, rizikových prvků či ukazatelů mikrobiálního znečištění (fekální koliformní bakterie, *E. coli*, salmonely a enterokoky). Analýzy byly prováděny podle běžných akreditovaných postupů vycházejících z řady příslušných ČSN. Obdobně byly odebrány, uchovány a zpracovány vzorky pro stanovení organických mikropolutantů, a to v externí laboratoři metodou LC-MS/MS.

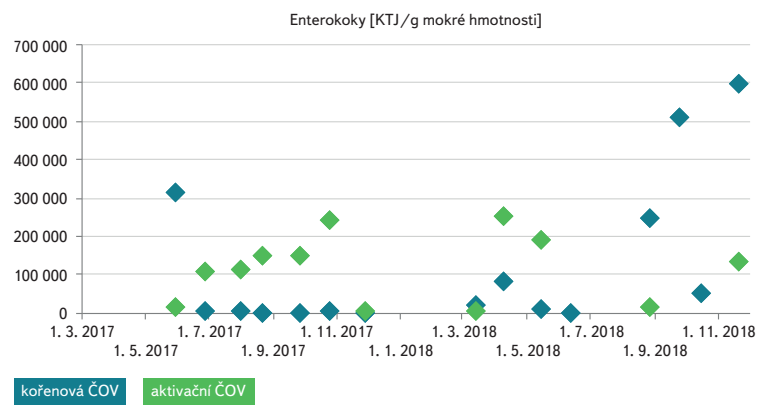
VÝSLEDKY A DISKUZE

Počáteční fází studie byl dvouletý průzkum složení kalů a jejich kontaminace, který byl proveden na dvou ČOV malých obcí do 2 000 EO. Vybrány byly ČOV zastupující obě hlavní technologické skupiny, a to mechanicko-biologické (aktivační) a kořenové ČOV.

Výsledky monitoringu v letech 2017 a 2018 byly zohledněny v další fázi studie, kdy byla navržena extenzivní odvodňovací zařízení na platformě RB jednotek, v poloprovozním měřítku. Pro koncept objemu, zatížení kalem a způsobu provozu (interval napouštění, napouštěné dávky, fáze odvodnění a mineralizace, konečná fáze zrání a stabilizace kalů) byly využity údaje o změnách sušiny v kalu, obsahu organického podílu a mikrobiální kontaminace. Analýza přítomnosti rizikových prvků byla nezbytná pro posouzení rizikovosti a toxicity kalů vzhledem k jejich možnému dalšímu uplatnění jako součástí hnojivých směsí. Naopak analýza množství živin byla důležitá pro vyhodnocení vhodných doplňkových přísad hnojivých směsí za účelem jejich standardizace, co se obsahu přístupných živin týče. Na obr. 1 a 2 jsou znázorněny obsahy vybraných hygienicky významných bakterií a rizikových prvků v kalech obou pilotních čistíren. Koncentrace enterokoků v kalech obou čistíren měla značný rozptyl, v případě KČOV opět v závislosti na stáří kalu. Fekální koliformní bakterie naopak vykazovaly vyšší rozptyl u MBČOV.

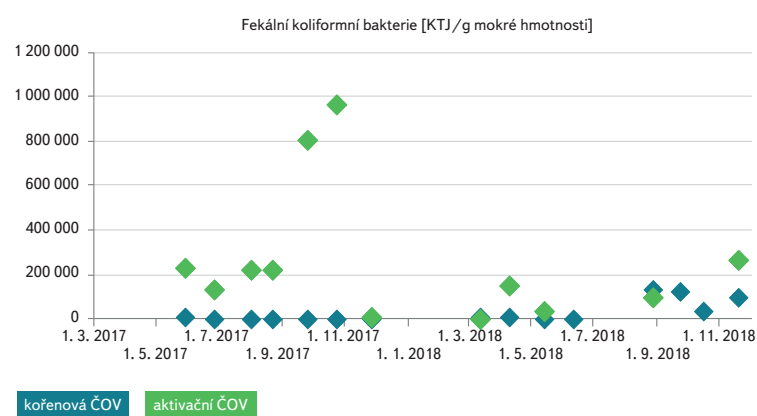
U většiny rizikových prvků (zde vybrány čtyři – Cd, Cr, Hg a Ni) byly zjištěny vyšší obsahy v kalech kořenové čistírny (obr. 3 až 6). Vysvětlujeme si to i vlivem napojení srážkových vod, smyvů ze zpevněných povrchů, smyvů prachu z atmosférických depozic apod. do jednotné kanalizační sítě. Nicméně ani tyto kaly nejsou zatíženy sledovanými prvky nad limit vyhlášky [10] o použití kalů v zemědělství, platné v čase provedení studie. V současnosti stanovuje prakticky stejné limity vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, platná od července 2021.

Na obr. 7 až 11 jsou znázorněny podíly sušiny, obsahy organické složky a vybraných nutrientů. Sušina odebraných vzorků kalů odpovídala stavu jejich zpracování. V případě aktivační ČOV byl kal odvodněn odstředivkou (sušina okolo 20 %). Výkyvy v sušině byly způsobeny poruchami v technologii během



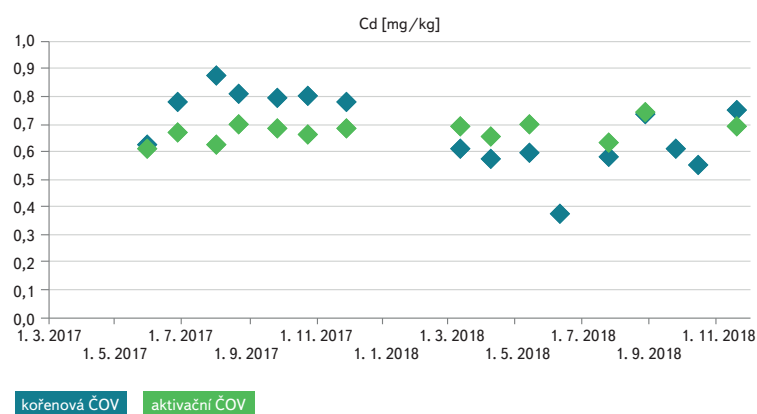
Obr. 1. Obsah enterokoků v kalech

Fig. 1. Enterococci content in the sludges



Obr. 2. Obsah fekálních koliformních bakterií v kalech

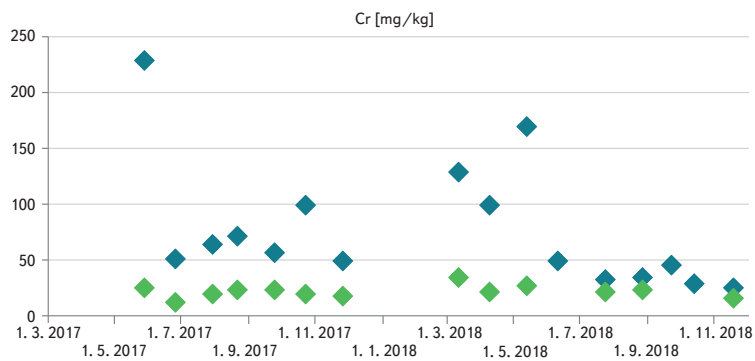
Fig. 2. Faecal coliform bacteria content in the sludges



Obr. 3. Obsah kadmia v kalech

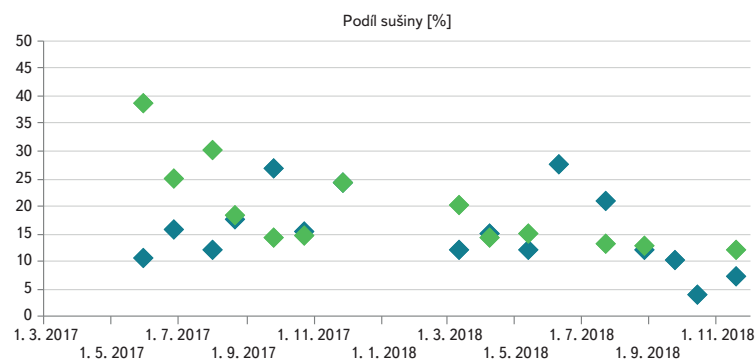
Fig. 3. Cadmium content in the sludges

sledovaného období. Sušina kalu kořenové ČOV závisela na stáří kalu. U této ČOV je kal vyvážen z anaerobního vyhřívacího prostoru šterbinové usazovací nádrže, jakož i z usazovacího prostoru této nádrže a z lapáku písku cca 1x za 3 měsíce. Sušina tak kolísala od řídké směsi pod 10 % až po hodnoty okolo 25 až 30 %. Vyšší hodnoty souvisí s délkou uložení kalu ve vyhřívacím prostoru. S přibývajícím časem od vyvážení obvykle dochází v horní části vyhřívacího prostoru k tvorbě silné, poměrně suché krusty. Ztráta žíháním a obsah organických látek byly po celou dobu nižší u kalu kořenové čistírny v důsledku jeho anaerobního vyhívání.



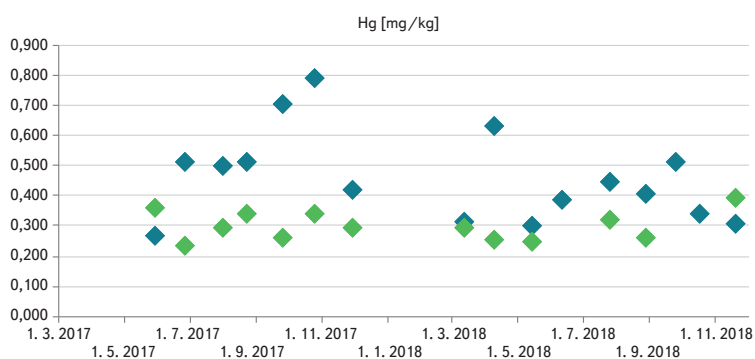
kořenová ČOV aktivační ČOV

Obr. 4. Obsah chromu v kalech
Fig. 4. Chromium content in the sludges



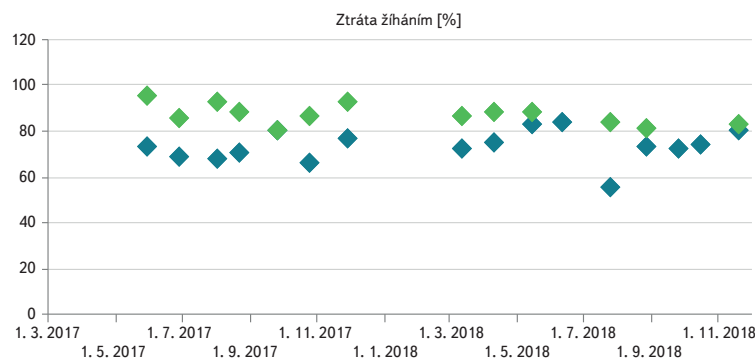
kořenová ČOV aktivační ČOV

Obr. 7. Podíl sušiny v kalech
Fig. 7. Dry matter ratio of the sludges



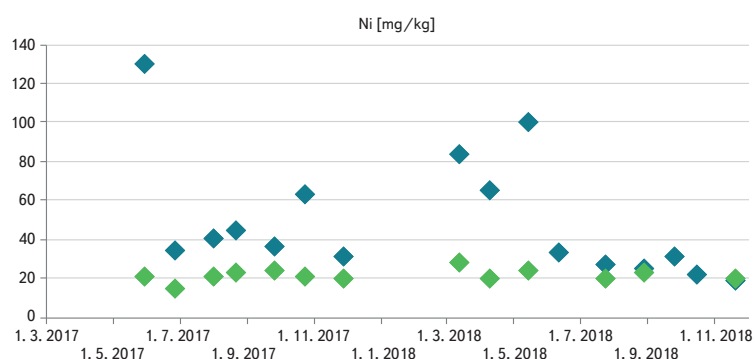
kořenová ČOV aktivační ČOV

Obr. 5. Obsah rtuti v kalech
Fig. 5. Mercury content in the sludges



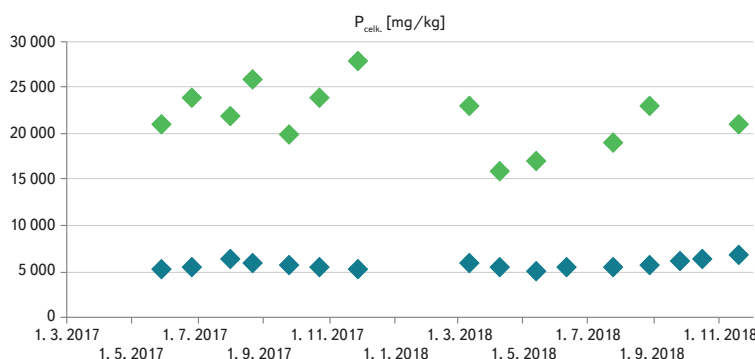
kořenová ČOV aktivační ČOV

Obr. 8. Ztráta žháním v kalech
Fig. 8. Organic matter content in the sludges



kořenová ČOV aktivační ČOV

Obr. 6. Obsah niklu v kalech
Fig. 6. Nickel content in the sludges

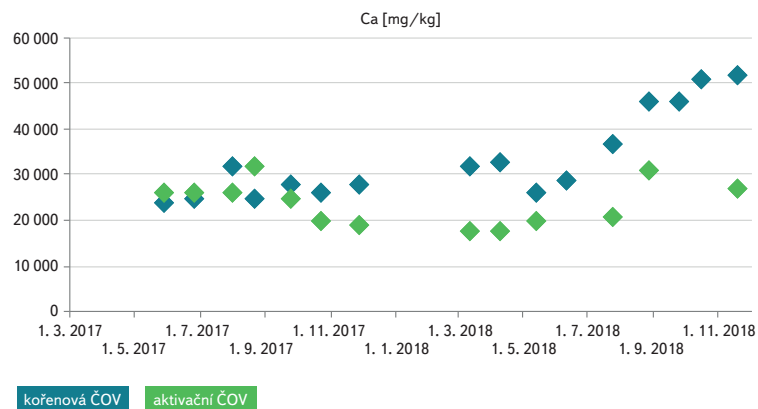


kořenová ČOV aktivační ČOV

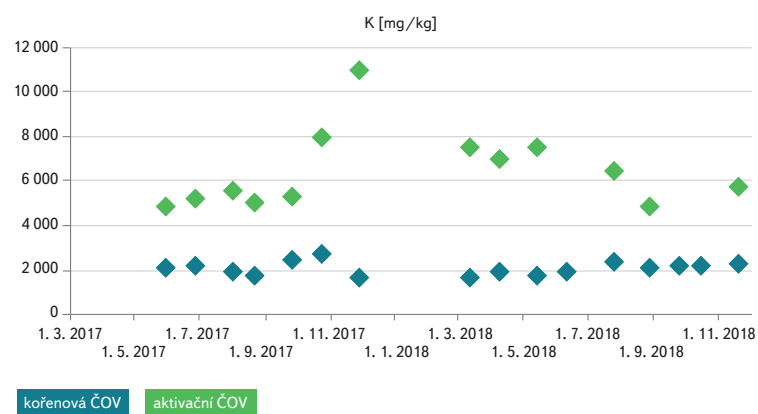
Obr. 9. Obsah fosforu v kalech
Fig. 9. Phosphorus content in the sludges

Obsah fosforu v kalu byl cca 5x vyšší v případě MBČOV. U této čistírny jeho obsah v kalu také značně kolísal. Naopak v kalu kořenové ČOV byl obsah fosforu po celou dobu sledování poměrně stabilní – okolo 5 000 mg/kg sušiny kalu. Obsah draslíku byl též výrazně vyšší v kalu MBČOV, a to s velkým rozptylem. Naopak v kalu KČOV byl jeho obsah poměrně stabilní – okolo 2 000 mg/kg sušiny kalu. Obtížně vysvětlitelný byl pozorovaný nárůst obsahu vápníku v kalu KČOV. Patrně opět souvisel s aktuálními vlastnostmi a stářím kalu, protože koreluje spíše s nižšími hodnotami sušiny kalu v závěru roku 2018.

S ohledem na výsledky dvouletého monitoringu, který odhalil pro některé ukazatele podstatný rozdíl mezi kalemi vybraných typů ČOV, a s ohledem na produkci kalu těmito ČOV, kdy KČOV se vyznačovala významně menší produkcí, bylo rozhodnuto, že v rámci studie má větší perspektivu propojení RB jednotky k odvodnění a stabilizaci kalu s KČOV. I když byly i nadále prováděny poloprovodní experimenty s využitím RB jednotek pro MBČOV, pozornost byla soustředěna na kombinaci KČOV + poloprovodní RB jednotky v kombinaci se zakrytím a bez zakrytí skleníkem [5]. Dále v článku jsou tedy detailně rozvedeny výsledky



Obr. 10. Obsah vápníku v kalech
Fig. 10. Calcium content in the sludges



Obr. 11. Obsah draslíku v kalech
Fig. 11. Potassium content in the sludges

této kombinace. Použití RB jednotky k odvodnění a stabilizaci kalu MBČOV vyžaduje zcela odlišný režim provozu a napouštění, které povedou k obdobné míře stabilizace kalu [5].

Tab. 1 zobrazuje změny obsahu rizikových prvků – převážně kovů, mikrobiální kontaminace a obsahu vybraných nutrientů, stejně jako sušiny a ztráty žiháním (obsahu organického podílu) během procesů nakládání se vstupním surovým kalem KČOV. A to přes odvodnění a hygienizaci pozvolným samostatně běžícím procesem biologické stabilizace během uložení v RB jednotce, navazující síťování výsledné směsi z RB jednotky přes síto 4 mm až po finální produkty – hnojivé směsi.

Patrný je zásadní úbytek mikrobiální kontaminace během procesu odvodnění a stabilizace. Mikrobiální kontaminace zcela vymizí díky tepelné úpravě při přípravě hnojivých směsí. Současně dochází ke zhruba polovičnímu úbytku organického podílu (pokles ztráty žiháním). Jak na vstupu, tak i v konečných produktech nebyly zjištěny nadlimitní koncentrace sledovaných těžkých kovů a rizikových prvků, i když odvodněním a stabilizací v RB jednotce dochází k určitému stupni zakoncentrování.

Jak bylo uvedeno výše, hodnocení obsahu rizikových prvků a mikrobiální kontaminace kalů a materiálů bylo v čase provádění studie zpracováno s využitím vyhlášky č. 437/2016 Sb. [10], která však byla s novelizací legislativy k nakládání s odpady zrušena, a to k 1. lednu 2021. Náhradou by měla být vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Ta definuje prakticky totožné limitní hodnoty. Všechny výše zmíněné materiály splňovaly stanovené požadavky na obsah rizikových látek.

Uvedené údaje o zjištěných koncentracích rizikových prvků a mikrobiálním znečištění lze porovnat s výsledky rozsáhlejšího průzkumu malých ČOV různých technologií [11]. Výsledky pro vstupní kalovou směs jsou srovnatelné. Zjištěné koncentrace v odvodněné směsi odpovídají údajům publikovaným v zahraničí, např. v rámci studie Uggetti a kol. [9].

Součástí studie bylo také provedení analýz na obsah rizikových látek ze skupiny organických mikropolutantů, zejména léčiv. Tab. 2 a 3 prezentují výsledky jednorázově provedených analýz jak ve vzorcích vstupních kalových směsí, tak ve výsledných odvodněných směsích kalu a vegetace rákosu obecného nacházejících se během provozu na povrchu RB jednotek za sezónu 2018 a 2019. Jde o lokalitu KČOV.

Ve dvou směšných vzorcích, reprezentujících vstupní kal a výslednou odvodněnou a stabilizovanou směs kalu a biomasy ze sezóny 2018, bylo analyzováno 44 vybraných organických mikropolutantů. Z toho 22 nebylo prokázáno ani ve vstupním kalu (50 % látek). U 10 látek došlo k významné eliminaci, protože nebyly zvolenou analytickou metodou ve výstupní směsi detekovány. U sedmi dalších látek byl zjištěn úbytek nad 75 %, u dvou látek úbytek nad 70 % a u jedné nad 50 %. Úbytek definujeme jako rozdíl mezi změněnou vstupní (ve vstupním kalu) a výstupní (kalová směs po skončení procesu odvodnění a stabilizace) koncentrací. U triclocarbanu byla naměřena vyšší koncentrace ve výstupní směsi. Tato látka bývá, spolu s triclosanem (látka s úbytkem cca 51 %), přítomna v mýdlech, zubních pastách, deodorantech apod.

Ve vzorcích za sezónu 2019 již bylo analyzováno 67 látek. Z toho 44 nebylo prokázáno ani ve vstupním kalu (66 % látek). U 13 látek došlo k významné eliminaci, protože nebyly zvolenou analytickou metodou ve výstupní směsi detekovány. U šesti dalších látek byl zjištěn úbytek nad 75 %, u dvou nad 50 %. U triclocarbanu (antimikrobiální a antifungální sloučenina) byla opět zjištěna vyšší koncentrace ve výstupní směsi. Z nově analyzovaných látek byla naměřena vyšší koncentrace ve výstupní směsi u látky celiprotol (základ léku pro léčbu vysokého krevního tlaku). Nepatrný rozdíl v koncentraci byl u látky irbesartan (základ léku pro léčbu vysokého tlaku a diabetických chorob ledvin).

Analýza změn obsahu sušiny a organického podílu během provozu RB jednotek v návaznosti na napouštění surové kalové směsi uskutečněná v rámci výzkumné studie je podrobně popsána v článku [5]. RB jednotky byly plněny tekutým kalem se sušinou mezi 2 až 13 %, v závislosti na původu kalu a s použitím různých schémat nakládání pro studované období 2017–2019. RB jednotky prokázaly velmi slibné výsledky, pokud jde o odvodnění kalu. Na konci každé kampaně odvodnění bylo dosahováno 30–40 % sušiny kalu. V případě jednotky RB zakryté skleníkem dosáhlo odvodňování kalu hodnot sušiny mezi 51 % a 80 % v závislosti na ročním období a klimatických podmínkách. Vliv vstupních charakteristik kalů a posouzení vlivu volby přítokového zatížení se věnuje článek Vincenta a kol. [12]. Návrhové zatížení a způsob provozu námi využitých poloprodučních RB jednotek [5] odpovídá doporučením výše zmíněné publikace.

Jak již bylo uvedeno v úvodu, s ohledem na přítomnost řady běžně nesledovaných polutantů v čistírenských kalech, viz např. uvedené organické mikropolutanty, praxe směřuje k využívání návazných technologií zpracování kalů před jejich možným následným využitím. Dalším krokem vedoucím k uplatnění upravených a stabilizovaných čistírenských kalů v zemědělství je tedy volba vhodné technologie dosoušení kalu a přípravy organominerálních hnojiv. Jak obostojí na trhu, bude záviset především na ověření kvality a ceny těchto materiálů oproti standardním dávkám hnojiv typu NPK. Za tímto účelem je vhodné standardizovat obsah potřebných živin v dostupné formě pro vegetaci, a to např. přidáním dalších složek během zpracování na konečný produkt.

V rámci naší studie padla volba na zpracování odvodněných a stabilizovaných směsí kompostováním a peletkováním. V článku je dále prezentována část věnovaná peletkování. Cílem bylo připravit a odzkoušet dvě různé varianty hnojiva ve formě organominerální peletky:

Tab. 1. Porovnání složení a kontaminace vstupního kalu, finálních materiálů z RB jednotek a hnojivých produktů

Tab. 1. Comparison of composition and contamination of input sludge, final materials from RB units and fertilizer products

Označení materiálu	Enterokoky [KTJ/g sušiny]	Escherichia coli [KTJ/g sušiny]	Fek. kolif. bakt. [KTJ/g sušiny]	Salmonely	Kultiv. MO při 22 °C [KTJ/g sušiny]	Kultiv. MO při 36 °C [KTJ/g sušiny]
Vstupní kalová směs	6 880 000	1 870 000	2 530 000	neg. v 50 g materiálu	1 990 000 000	486 000 000
Finální materiál z RB jednotky	2 060	8 260	26 800		80 500 000	78 400 000
Finální materiál z RB jednotky sítovaný [síto 4 mm]	162	162	324		140 000 000	76 200 000
Hnojivo „Startér S1“	0	0	0		1 240 000	688 000
Hnojivo „Fertilizér F1“	0	0	0		12 000 000	8 940 000
Limitní hodnoty [10]	5 vz. < 1000		5 vz. < 1000	neg. v 50 g materiálu		

Označení materiálu	VL ztráta žiháním [%]	Sušina [%]	P celk. [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]
Vstupní kalová směs	60,2	8,7	5 600	640	1 800	22 000	2 800	6 900	110
Finální materiál z RB jednotky	30,4	48,5	11 000	520	2 800	56 000	5 900	19 000	320
Finální materiál z RB jednotky sítovaný [síto 4 mm]	28,8	57,5	11 000	610	4 300	52 000	6 200	20 000	340
Hnojivo „Startér S1“	39,4	88,2	33 000	470	34 000	35 000	11 000	15 000	240
Hnojivo „Fertilizér F1“	29,8	87,3	13 000	610	4 100	70 000	6 600	27 000	360
Limitní hodnoty [10]	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Označení materiálu	Al	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	V	Zn
	[mg/kg]												
Vstupní kalová směs	6 000	< 4,5	0,27	0,50	7,6	20	99	0,28	1,8	15	12	14	550
Finální materiál z RB jednotky	14 000	6,0	0,68	0,97	6,7	39	220	0,75	3,1	32	36	32	1 100
Finální materiál z RB jednotky sítovaný (síto 4 mm)	19 000	6,5	0,82	0,94	7,3	47	210	0,78	3,1	30	39	40	1 100
Hnojivo „Startér S1“	12 000	4,4	0,56	0,73	49	36	170	0,58	26	22	36	26	800
Hnojivo „Fertilizér F1“	18 000	7,3	0,78	0,96	7,4	48	210	0,55	3,8	29	44	40	1 000
Limitní hodnoty [10]	–	30	–	5	–	200	500	4	–	100	200	–	2 500

Tab. 2. Výsledky analýz vybraných organických mikropolutantů v materiálech za rok 2018

Tab. 2. Results of analyses of selected organic micropollutants in materials in 2018

Látka	Jednotky	Vstupní kal	Směs po skončení procesu
Atenolol	ug/kg suš	3,3	< 1,0
Bezafibrate	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Caffein	ug/kg suš	1220,0	< 2,0
Clarithromycin	ug/kg suš	354,0	7,1
Diclofenac	ug/kg suš	60,0	< 10,0
Diclofenac-4'-hydroxy	ug/kg suš	< 20,0	< 20,0
Erythromycin	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Furosemide	ug/kg suš	72,6	< 10,0
Gabapentin	ug/kg suš	12,2	1,8
Gemfibrozil	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Hydrochlorothiazide	ug/kg suš	78,6	8,0
Chloramphenicol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Ibuprofen	ug/kg suš	127,0	< 10,0
Ibuprofen-2-carboxy	ug/kg suš	54,7	< 5,0
Ibuprofen-2-hydroxy	ug/kg suš	54,1	< 20,0
Iohexol	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Iopamidol	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Iopromide	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Karbamazepin	ug/kg suš	49,7	10,7
Karbamazepin-2-hydroxy	ug/kg suš	2,4	< 1,0
Karbamazepin 10,11-dihydro-10-hydroxy	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Karbamazepin 10,11-dihydroxy	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Karbamazepin 10,11-epoxid	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Ketoprofen	ug/kg suš	2,6	< 1,0
Metoprolol	ug/kg suš	96,5	6,4
Naproxene	ug/kg suš	17,0	< 10,0
Naproxene-O-desmethyl	ug/kg suš	15,1	< 5,0
Oxcarbazepine	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Paracetamol	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Peniciline G	ug/kg suš	1,1	< 1,0
Roxithromycin	ug/kg suš	7,8	2,1
Saccharin	ug/kg suš	70,2	< 10,0
Sertraline	ug/kg suš	200,0	25,2
Sulfamerazine	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfamethazin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfamethoxazol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfanilamide	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Sulfapyridin	ug/kg suš	80,7	3,8
Tramadol	ug/kg suš	27,0	7,5

Látka	Jednotky	Vstupní kal	Směs po skončení procesu
Triclocarban	ug/kg suš	63,9	237,0
Triclosan	ug/kg suš	236,0	115,0
Trimetoprim	ug/kg suš	46,7	< 10,0
Venlafaxine	ug/kg suš	279,0	36,2
Warfarin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0

Oranžové zvýraznění – látka byla detekována zvolenou analytickou metodou

Tab. 3. Výsledky analýz vybraných organických mikropolutantů v materiálech za rok 2019

Tab. 3. Results of analyzes of selected organic micropollutants in materials in 2019

Látka	Jednotky	Vstupní kal	Směs po skončení procesu
Acebutolol	ug/kg suš	35,6	2,2
Acesulfam	ug/kg suš	11,2	< 2,0
Atenolol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Bezafibrate	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Bisfenol B	ug/kg suš	< 5,0	< 5,0
Bisfenol S	ug/kg suš	4,1	< 1,0
Bisoprolol	ug/kg suš	2,5	< 1,0
Caffein	ug/kg suš	9,4	< 2,0
Celiprolol	ug/kg suš	1,0	2,9
Clarithromycin	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Clindamycin	ug/kg suš	3,4	< 1,0
Clofibric acid	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Cyclophosphamide	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Diclofenac	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Diclofenac-4'-hydroxy	ug/kg suš	< 20,0	< 20,0
Erythromycin	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Fluconazole	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Furosemide	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Gabapentin	ug/kg suš	4,1	< 1,0
Gemfibrozil	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Hydrochlorothiazide	ug/kg suš	6,6	< 2,0
Chloramphenicol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Ibuprofen	ug/kg suš	12,1	< 10,0
Ibuprofen-2-carboxy	ug/kg suš	50,6	< 5,0
Ibuprofen-2-hydroxy	ug/kg suš	< 20,0	< 20,0
Iohexol	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Iomeprol	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Iopamidol	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Iopromide	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0

Irbesartan	ug/kg suš	9,6	9,4
Karbamazepin	ug/kg suš	23,8	4,5
Karbamazepin-2-hydroxy	ug/kg suš	1,3	< 1,0
Karbamazepin 10,11-dihydro-10-hydroxy	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Karbamazepin 10,11-dihydroxy	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Karbamazepin 10,11-epoxid	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Ketoprofen	ug/kg suš	1,1	< 1,0
Lamotrigine	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Lovastatin	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Memantine	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Metoprolol	ug/kg suš	21,3	1,5
Naproxene	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Naproxene-O-desmethyl	ug/kg suš	< 5,0	< 5,0
Oxcarbazepine	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Paracetamol	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Peniciline G	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Phenazone	ug/kg suš	< 2,0	< 2,0
Primidone	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Propranolol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Propyphenazone	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Roxithromycin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Saccharin	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Sertraline	ug/kg suš	63,8	10,5
Simvastatin	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Sotalol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfamerazine	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfamethazin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfamethoxazol	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Sulfanilamide	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Sulfapyridin	ug/kg suš	3,2	1,0
Tiamulin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0
Tramadol	ug/kg suš	8,4	1,8
Triclocarban	ug/kg suš	61,9	189,0
Triclosan	ug/kg suš	188,0	66,1
Trimetoprim	ug/kg suš	< 10,0	< 10,0
Valsartan	ug/kg suš	< 5,0	< 5,0
Venlafaxine	ug/kg suš	56,8	9,8
Warfarin	ug/kg suš	< 1,0	< 1,0

Oranžové zvýraznění – látka byla detekována zvolenou analytickou metodou

Peletované hnojivo typ startér („Startér S1“ v tab. 4) v sobě kombinuje vlastnosti organické hmoty (čistírenského kalu) k stabilizaci minerální formy živin ve snaze zabránit jejich rozplavení. Složení hnojiva typu startér vychází z doporučené dávky makroprvků podle publikace Hluška a Richtera [13], přičemž poměr jednotlivých prvků v novém hnojivu byl nastaven podle pravidel využitelnosti makro a mikroprvků v kompetici s dusíkem podle publikace Szabla [14]. Dávkování nového hnojiva se řídí pravidly agronormativu podle vyhlášky 377/2013 Sb. [15], vydané Ministerstvem zemědělství (MZe) v platném znění. Na základě těchto přístupů se podařilo připravit nové, relativně stabilní hnojivo s krátkým poločasem uvolnění potřebných živin ve prospěch rostlin, které se dobře dávkuje do půdy běžnými zemědělskými stroji.

Peletované hnojivo typ fertilizér („Fertilizér F1“ v tab. 4) v sobě kombinuje vlastnosti organické hmoty (čistírenského kalu) a vápnatého prekurzoru. Kombinace těchto dvou složek je v zemědělství již řadu let odzkoušena. Výhodným zdrojem vápnatého prekurzoru se ukázalo být využití saturačního kalu z výroby cukru (neboli tzv. šámy). Šáma obsahuje kromě sraženého CaCO_3 (75 až 77 % hmotnosti v sušině) i další vysrážené soli, hlavně MgO (až 4 % hmotnosti), a zejména vysokomolekulární koagulované necukry (1,1 až 1,7 % hmotnosti v sušině) [16]. Šáma je zdrojem sacharózy (až 4 % hmotnosti v sušině), což pozitivně působí na rozvoj mikrobiální složky půd [18]. Aplikace šámy vzhledem k vysokému podílu necukrů má výrazně pozitivní vliv na rozvoj půdního mikrobiálního společenstva, což vede nejen k posílení půdní struktury, ale i k rozvoji půdních mikroorganismů, a tím k zlepšení „zdraví půdy“.

Výhoda zvolené technologie spočívá především v nastavení optimálního složení a vlhkosti vstupujících materiálů k efektivní výrobě pelet o průměru 8 mm, uzpůsobených k aplikaci do zóny růstu plodin.

Tab. 4 ukazuje výsledné prvkové složení obou připravených matic. Prvkové složení a vybrané charakteristiky, např. hodnoty pH, jsou uvedeny jako průměrné měřené hodnoty z více opakování. Dále je uvedena hodnota směrodatné odchylky datového souboru pro každý parametr a prvek. Z pohledu hnojivého účinku matrice typu startér obsahuje téměř polovinu obsahu dusíku v amonné formě (N-NH_4^+), což je pro výživu rostlin pozitivní. Obsah amonné a nitrátové formy dusíku (5,45 %) se blíží teoretické hladině 6 % dusíku (N). Odpovídající je i obsah přístupného fosforu (P) 2,08 % (teoreticky 2,5 %), přístupného draslíku (K) 2,85 % (teoreticky 3,3 %) a hořčíku (Mg) 0,66 % (teoreticky 0,6 %).

V matrici typu fertilizér už tolik nezáleží na odpovídajícím prvkovém složení, zde jsou podstatné vlastnosti popisující kvalitu půdní organické hmoty, především obsah humusu, jenž tvoří 18 %, dále kvalitu huminových složek Q4/6, která je vysoce nad hranicí 4 (hodnota barevného kvocientu), charakterizující kvalitní huminové složky, a zejména vysoký obsah snadno rozložitelných C složek (C-hws). Obsah přístupného vápníku (Ca) v matrici se pohybuje kolem 4 %.

Rozsah chemického složení obou hnojiv může v rámci přípravy značně kolísat. Důvodem je:

1. variabilní prvkové složení čistírenského kalu, jak ukazuje publikace Černého [17]
2. rozsah vstupních parametrů z cukrovarnického kalu (šámy), jak ukazuje publikace Šárky [16]

Nová peletovaná hnojiva na bázi čistírenských kalů z RB technologie jsou vyráběna ve formě pelet o průměru 8 mm. Pro přípravu pelet je nutné připravit materiál o sušině 75 až 80 % hm. Právě peletovaná forma hnojiva umožní jeho snadnou skladovatelnost a aplikovatelnost pomocí zemědělské mechanizace přímo do zóny růstu konkrétních plodin.

Tab. 4. Živinné složení připravených hnojiv
Tab. 4. Nutrient composition of prepared fertilizers

Označení analýzy	Jednotka	Startér S1		Fertilizér F1		
		PRUM	± SM	PRUM	± SM	SM
pH H_2O		5,30	± 0,00	7,21	± 0,01	
pH KCl		5,26	± 0,00	7,13	± 0,01	
sorpce T (CEC)	mmol+/100 g	32,85	± 0,34	46,70	± 0,33	
N/ NO_3	mg/kg	3,05	± 0,03	0,12	± 0,00	
N/ NH_4	mg/kg	2,40	± 0,01	0,06	± 0,01	
Ntot	%	3,71	± 0,23	1,44	± 0,02	
Cox	%	7,66	± 0,26	10,79	± 0,10	
humus	%	13,18	± 0,44	18,55	± 0,16	
Q (472/644)		5,5	± 0,0	6,0	± 0,0	
C-hws	%	0,44	± 0,02	0,32	± 0,00	
přístupný Ca	%	1,84	± 0,03	3,67	± 0,02	
přístupný K	%	2,85	± 0,05	0,09	± 0,00	
přístupný Mg	%	0,66	± 0,01	0,16	± 0,00	
přístupný P	%	2,08	± 0,01	0,12	± 0,00	
vázaný K	%	0,30	± 0,00	0,30	± 0,03	
vázaný Mg	%	0,92	± 0,00	0,57	± 0,00	
vázaný Ca	%	3,39	± 0,10	6,69	± 0,07	
vázaný P	%	3,07	± 0,03	1,25	± 0,01	
vázané Fe	%	1,38	± 0,00	2,47	± 0,03	
vázaný Co	mg/kg	40,06	± 0,01	6,39	± 0,03	
vázaný Mn	mg/kg	197	± 0	288	± 2	
vázaný Mo	mg/kg	26,84	± 0,27	3,61	± 0,02	
vázaný Zn	mg/kg	798	± 18	966	± 36	

ZÁVĚR

Studie prokázala, že využití technologie založené na extenzivním odvodnění kalů a jejich stabilizaci v kalových polích s vhodnou mokřadní vegetací, případně s využitím ochrany proti ředění vysoušené směsi srážkami (skleník, stříška), může představovat alternativu k jiným technologiím, zejména v kombinaci s KČOV. Podmínkou je dostatečně velká plocha pozemků, což je často případ malých obcí, které KČOV využívají.

Procesy probíhající v RB jednotkách s napuštěnými čistírenskými kalů a s vegetací mokřadních rostlin popisuje řada zahraničních publikací [8, 9]. Hlavní provozní zásady, chyby při návrzích a provozu i doporučení pro další nakládání s odvodněnou hmotou shrnuje práce Brixie [4]. Při návrhu RB jednotek pro určité území je nutné v závislosti na klimatických podmínkách hledat

optimální interval a délku periody napouštění a vysoušení. Extenzivní čistírny (kořenové čistírny, umělé mokřady apod.) mají nižší produkci kalu spojenou s provozem objektů mechanického předčištění (různé typy usazovacích nádrží nebo vícekomorových septiků), zpravidla s vyvážením několikrát ročně. Dosažené výsledky ukazují, že i s ohledem na co nejvyšší eliminaci organických mikropolutantů bude nutné ponechání materiálu v jednotce po ukončení napouštění a vysoušení po doporučenou dobu jedné sezony (letní či zimní) [1, 3], což umožní mineralizaci materiálu, jeho hygienizaci a stabilizaci. Výsledná hmota by měla dosáhnout vlastností a složení srovnatelného s konečnými produkty kompostování kalů s biologickými složkami [2], jak ukazují výsledky rozboru materiálů z pokusných RB jednotek po jejich odstavení na dobu několika měsíců.

Popsaná technologie odvodnění čistírenských kalů může být prvním stupněm úpravy, který při zajištění následných vhodných kroků, např. standardizace substrátů (přidáním dalších přísad, zpracováním do peletek apod.) otevírá cestu pro racionální využití kalů na orné půdě. V našem případě bylo upraveného a vysušeného kalu z RB jednotek využito k přípravě organominerálních hnojiv. Předpokládáme, že aplikace organominerálních hnojiv do půdy bude mít vysoce pozitivní vliv nejen pro tvorbu stabilní půdní struktury, ale především téměř eliminuje riziko spojené s vyplavováním dusíku a fosforu do povrchových a podzemních vod. Při uplatnění kompostovaného materiálu na půdu se předpokládá také významný krycí efekt, kdy kompost aplikovaný na povrch půdy působí jako mulč a významně snižuje riziko vzniku vodní eroze.

Poděkování

Príspevek byl zpracován za finanční podpory projektu SS02030008 „Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost“ a s využitím výsledků projektu TH02030532 „Nové postupy úpravy a stabilizace čistírenských kalů z malých komunálních zdrojů“ v rámci jeho implementace.

Literatura

- [1] JAROLÍMOVÁ, V. Aplikace kalů z čistíren odpadních vod na zemědělské půdě a související legislativa. *Biom.cz* [on-line]. 27. červen 2019 [vid. 16. září 2021]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/aplikace-kalu-z-cistiren-odpadnich-vod-na-zemedelske-pude-a-souvisejici-legislativa>
- [2] PAUL, E. A., CLARK, F. E. *Soil Microbiology and Biochemistry*. New York: Academic Press, (1996), 340 s.
- [3] GUO, L. B., GIFFORD, R. M. Soil Carbon Stocks and Land Use Change: A Meta Analysis. *Global Change Biology*. 2002, 8, s. 345–360
- [4] BRIX, H. Sludge Dewatering and Mineralization in Sludge Treatment Reed Beds. *Water*. 2017, 9, s. 160
- [5] ROZKOŠNÝ, M., ŠEREŠ, M., HUDCOVÁ, H., HNÁTKOVÁ, T., MRVOVÁ, M. Sludge Dewatering Reed Beds and their Performance in Terms of Sludge Quality Improvement at Small Wastewater Treatment Plants. *Waste Forum*. 2020, č. 4, s. 201–216
- [6] KANNEPALLI, S. et al. Composting of Aged Reed Bed Biosolids for Beneficial Reuse: A Case Study in New Jersey, USA. *Compost Science and Utilization*. 2016, 24(4), s. 281–290
- [7] KOLECKA, K. et al. Integrated Dewatering and Stabilization System as an Environmentally Friendly Technology in Sewage Sludge Management in Poland. *Ecological Engineering*. 2017, 98, s. 346–353
- [8] PERUZZI, E. et al. Stabilization Process in Reed Bed Systems for Sludge Treatment. *Ecological Engineering*. 2017, 102, s. 381–389
- [9] UGGETTI, E., FERRER, I., LLORENS, E., GARCÍA, J. Sludge Treatment Wetlands. A Review on the State of the Art. *Bioresource Technology*. 2010, 101, s. 2905–2912
- [10] *Vyhlaška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě*. Pozn. Zrušena k 1. lednu 2021. Náhrada: *Vyhlaška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*
- [11] ROZKOŠNÝ, M., HUDCOVÁ, H., PLOTĚNÝ, M., NOVOTNÝ, R., MATYSÍKOVÁ, J. Kvalita kalů a odpadů z domovních a malých ČOV a možnosti jejich využití v zemědělství. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2015, 57(6), s. 44–49
- [12] VINCENT, J., FORQUET, N., MOLLE, P., WISNIEWSKI, Ch. Mechanical and Hydraulic Properties of Sludge Deposit on Sludge Drying Reed Beds (SDRBs): Influence of Sludge Characteristics and Loading Rates. *Bioresource Technology*. 2012, 116, s. 161–169

[13] HLUŠEK, J., RICHTER, R. *Bilance živin v rostlinné výrobě ČR a potřeba hnojení. Racionální použití hnojiv – sborník z konference*. 2006. *Biom.cz* [on-line]. [vid. 16. září 2021]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bilance-zivin-v-rostlinne-vyrobe-cr-a-potreba-hnojeni>. ISBN 978-80-213-2006-2.

[14] SZABLA, K. *Szkołkarstwo kontenerowe: nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym*. Warszawa: Centrum Informacji Lasów Państwowych, 2003. ISBN 97-8838-8478437.

[15] *Vyhlaška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv*

[16] ŠÁRKA, E. Saturační kal – možnosti použití a vlastnosti. *Listy cukvarnické a řepašské*. 2008, 40, 124(12), s. 349–357

[17] ČERNÝ, J. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. 2009. *Biom.cz* [on-line]. 8. září 2014 [vid. 16. září 2021]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/projekty/konference-racionalni-pouziti-hnojiv-2009>

[18] RICHTER, R., HLUŠEK, J. *Výživa a hnojení rostlin (I. obecná část)*. Brno: VŠZ, 1994. 177 s. ISBN 80-7157-138-5.

Autoři

Ing. Josef Kratina, Ph.D.¹

✉ josef.kratina@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-6095-586X

Ing. Miloš Rozkošný, Ph.D.²

✉ milos.rozkosny@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-6617-5431

Ing. Hana Hudcová, Ph.D.²

✉ hana.hudcova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-7462-9333

Mgr. Michal Šereš³

✉ michal.seres@dekonta.cz

Ing. Ondřej Holubík⁴

✉ holubik.ondrej@vumop.cz

ORCID: 0000-0002-6519-5887

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Brno

³DEKONTA, a. s., Dřetovice

⁴Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha

Príspevek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.09.004

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE SMALL MUNICIPAL SOURCES SEWAGE SLUDGE EXTENSIVE STABILIZATION FOR THEIR USE AS A FERTILIZER

**KRATINA, J.¹; ROZKOŠNÝ, M.²; HUDCOVÁ, H.²; ŠEREŠ, M.³;
HOLUBÍK, O.⁴**

¹T. G. Masaryk Water Research Institute Prague

²TGM Water Research Institute Brno

³Dekonta, Ltd.

⁴Research Institute for Soil and Water Conservation Prague

Keywords: sewage sludge – sludge dewatering – sludge stabilization – soil quality – organic matter – composting – fertilization substrate

The article is devoted to the presentation of partial results of a study aimed at determining the potential use of extensive sludge dewatering technology for small municipal WWTPs (up to 1000 PE) in the conditions of the Czech Republic. The study has shown that the use of technology based on extensive sludge dewatering and their stabilization in sludge dewatering reed beds with suitable wetland vegetation can be an alternative to other technologies. Especially in combination with constructed wetland (CW) based WWTPs, which are characterized by lower sludge production. A sufficiently large area of available land for such technology is a key parameter. This is often an example of small municipalities that use CW WWTPs. The described technology of dewatering of sewage sludge can open the way for rational use of sludge on arable land by ensuring the first suitable treatment and standardization of substrates (mixing with selected additives, further processing into pellets, etc.). We assume that the application of organo-mineral fertilizers to the soil will have a highly positive effect not only on the formation of a stable soil structure, but above all almost eliminates the risk associated with leaching N and P into water.