



VODA
2025

16. BIENÁLNÍ
KONFERENCE CZWA
17.–19. ZÁŘÍ 2025
LITOMYŠL



**SBORNÍK
PŘÍSPĚVKŮ**

30
1995~2025



CzWA[®]

WWW.BIENALKACZWA.CZ

PROHLÁŠENÍ

Za věcnou správnost, obsahovou, jazykovou a grafickou úroveň příspěvků v tomto sborníku zodpovídají autoři. Stanoviska a doporučení obsažená v příspěvcích jsou názory a doporučení jejich autorů a nemusí nezbytně vyjadřovat stanoviska CzWA.

NÁZEV: Sborník příspěvků 16. bienální konference CzWA 2025

POČET STRAN: 644

© Kolektiv autorů, 2025

Editoři © Ivana Kabelková 2025, Andrea Benáková 2025, Jana Nábělková 2025, Vojtěch Bareš 2025

VYDAVATEL © Asociace pro vodu ČR z.s., Traťová 574/1, 619 00 Brno; 2025

ISBN 978-80-908629-5-1

Vyhodnocení dosavadních výsledků výzkumu v oblasti získávání fosforu z kalové vody

Míchal P.^{1*}, Švehla P.¹, Houdková L.², Kulhánek M.¹, Chládková H.², Ház S.², Pečenka M.³, Kazda V.³, Růžicková I.³, Wanner J.³, Tlustoš P.¹

¹ČZU v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát

²KUNST, spol. s r.o., Palackého 1906, 753 01 Hranice

³Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav technologie vody a prostředí, Technická 5, 166 28 Praha 6

*autor pro korespondenci, email: michalp@af.czu.cz

ABSTRAKT

Kalová voda vznikající při zahušťování a odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu se vyznačuje vysokým obsahem živin, zejména dusíku a fosforu. Stále častěji je možno zaznamenat tendence k „recyklaci“ a transformaci těchto živin obsažených v kalové vodě do podoby hnojiva využitelného ve výživě rostlin. Tím by došlo k přechodu směrem k tzv. cirkulární ekonomice se snahou o vytvoření produktu z odpadu s vyšší přidanou hodnotou, resp. k zisku cenné suroviny, která může snížit závislost na komerčně vyráběných minerálních hnojivech. Příspěvek se věnuje vyhodnocení výsledků experimentů zaměřených na získávání fosforu z kalové vody s využitím přísad vhodných srážecích činidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fosfor; cirkulární ekonomika; kalová voda; srážení; výživa rostlin

1. ÚVOD

Kalová voda produkovaná při zahušťování a odvodňování kalu zpracovaného anaerobní stabilizací je charakteristická vysokou koncentrací sloučenin dusíku, fosforu, i dalších živin, které se do kapalné frakce uvolňují v důsledku mineralizace organické hmoty kalu v metanizačních nádržích (Chudoba et al., 1991; Karmann et al., 2024).

Zejména vysoký obsah sloučenin N a P v kalové vodě, která je dále zpracovávána v hlavní lince čištění odpadní vody, může do značné míry komplikovat funkci ČOV z pohledu celkové efektivity odstranění těchto prvků, které jsou považovány za prioritní anorganické polutanty odpadních vod čištěných ve velkých městských čistírnách odpadních vod (ČOV). S řešením těchto problémů by mohlo pomoci oddělení čištění kalové vody mimo hlavní linku ČOV.

V České republice není aktuálně oddělení čištění kalové vody věnována v podstatě žádná pozornost. Ve světě se již více než dvě desítky let objevují tendence tento přístup aplikovat, přičemž nejznámější postupy oddělení čištění kalové vody se zaměřují na odstranění sloučenin dusíku. V tomto směru se uplatňuje zejména tzv. ANAMMOX proces (ANAerobic AMMonium OXidation). Existují ale i postupy oddělení čištění kalové vody umožňující získávat dusík pro jeho následné zemědělské využití. Jako perspektivní se v tomto směru jeví zejména stripování amoniaku (Karmann et al., 2024).

Fosfor bývá v kalové vodě obsažen v podstatně nižší koncentraci než dusík. Na druhou stranu je však obecně známým faktem, že také fosfor představuje z pohledu výživy rostlin základní makroprvek (Vaněk et al., 2016), přičemž zásoby hornin, které slouží jako dominantní zdroj pro výrobu minerálních hnojiv, mohou být vyčerpány i dříve než za 100 let (Cordell et al., 2009). Právě z těchto důvodů je možno v posledních cca patnácti letech v oboru čištění odpadních vod zaznamenat určitý posun v pohledu na problematiku fosforu, přičemž trendem je přechod z pouhého odstraňování na jeho opětovné získávání (Sýkorová et Wanner, 2011). Podstatnou část fosforu je možno získat právě z kalové vody (Holba et al., 2011).

2. MATERIÁL A METODY

Byly realizovány srážecí testy. Pro ty byla využita kalová voda produkovaná v objektu městské ČOV s kapacitou 30 000 EO. Základní charakteristiky použité kalové vody jsou uvedeny v tabulce 1, obsah základních živin, resp. makroprvků, pak v tabulce 2.

Tab. 1. Základní vlastnosti použité kalové vody.

Parametr (jednotka)	VL (g/l)	VL _{org} (g/l)	NL (g/l)	pH (-)
	0,92	0,05	0,05	8,0

Pozn.: VL – veškeré látky; VL_{org} – veškeré látky organické; NL – nerozpuštěné látky

Tab. 2. Obsah základních živin (mg/l) v použité kalové vodě

Parametr	P	K	Ca	Mg	S	N
Jednotka	111	148	54	6	9	643

Pro srážecí testy byly voleny chemikálie, které svým složením obohatí vzniklé fosforečné hnojivo také o další živiny (vápenné mléko - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dolomit - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, síran hořečnatý - MgSO_4) a síran železitý - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ se zvláštním důrazem na snahu o identifikaci optimálních variant jejich vhodných kombinací. Po následné sedimentaci byl získán produkt charakteru suspenze. V rámci konkrétního experimentu popsaného v tomto příspěvku bylo zpracováno 297 l kalové vody, přičemž bylo získáno 4,5 l výsledného produktu.

Vzorek produktu byl mimo jiné podroben prvkové analýze s důrazem na obsah základních živin, resp. makro-prvků. Přitom byly samostatně hodnoceny vlastnosti původní suspenze a její kapalně frakce oddělené centrifugací. Z hodnot pro původní suspenzi a pro její kapalnou složku byl dopočítán obsah v pevné frakci. Pro účely odstředění byla využita odstředivka SIGMA 2-16P s rotorem 12139-H při 13500 otáčkách po dobu 10ti minut při 15 892 g. Samostatně byl hodnocen celkový obsah daného prvku a jeho frakce okamžitě přístupná rostlinám. Celkový obsah prvků ve vzorku byl kvantifikován po rozkladu lučavkou královskou následnou analýzou s využitím ICP-OES. Za obsah okamžitě dostupných prvků rostlinám byla považována koncentrace zjištěná v kapalně frakci dané suspenze (v zásadě výluh materiálu ve vodě).

3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Základní charakteristiky získaného hnojiva jsou shrnuty v tabulce 3. Obsah fosforu a dalších makroprvků v získaném hnojivu (mg/l) je k dispozici v tabulce 4 včetně jeho distribuce v jednotlivých frakcích.

Tab. 3. Základní charakteristiky získaného hnojiva.

sušina (%)	org. sušina (% ze sušiny)	pH	NL (g/l)
14,2	11,0	8,8	137

Pozn.: NL – nerozpuštěné látky

Tab. 4. Obsah makroprvků (v mg/l) v hnojivu

Prvek	P	K	Ca	Mg	S	N
Původní suspenze	8 690	246	42 900	6 060	523	3 180
Kapalná frakce (okamžitě dostupný)	5,56	157	111	20,4	304	347
Pevná frakce	8 680	89	42 800	6 040	219	2 830

Za účelem komplexnějšího vyhodnocení výsledků jsou v tabulce 5 vyhodnoceny i koncentrace těchto prvků vztažené na obsah sušiny vyprodukovaného hnojiva (mg/kg sušiny).

Tab. 5. Obsah makroprvků (v mg/kg) v sušině hnojiva

Prvek	P	K	Ca	Mg	S	N
Celkový obsah	61 202	1 730	302 000	42 700	3 680	22 400
Okamžitě dostupný	39,1	1 100	785	143	2 140	2 360

Obsah fosforu ve výsledné suspenzi činil cca 0,87 %. Pokud vyjádříme jeho procentuální obsah v sušině, dojdeme k hodnotě cca 6,1 %. Celkový obsah fosforu je tak významně vyšší než v běžně používaných „alternativních“ prostředcích sloužících jako zdroj živin pro výživu rostlin. Nkoa et al. (2013) například publikoval obsah fosforu v sušině digestátu z bioplynových stanic v rozmezí 0,2 – 3,5 %. Cydzik-Kwiatkowska et Nosek (2020) uvádějí velmi podobný rozsah obsahu celkového fosforu pro anaerobně stabilizovaný kal v rozmezí 2,6 – 3,4 % fosforu v sušině. V rámci zpracování kalové vody bylo použito 297 litrů této vody, ze které bylo po sedimentaci získáno 4,5 l suspenze (viz výše). Celkový obsah P ve zpracovaném množství kalové vody (297 l) tedy při obsahu P v kalové vodě 111 mg/l (Tab. 2) činil 33 000 mg, resp. 33,0 g. Objem produktu, ve kterém byl zakonzentrován hlavní podíl P představoval cca 1,5 % původního objemu zpracované vody. Nízké odtokové koncentrace P v kalové vodě oddělené od produktu (řádově jednotky mg/l při koncentraci v kalové vodě 111 mg/l) svědčí o tom, že efektivita separace P z kalové vody přesahovala 90 %.

Obsah draslíku (mg/l) je v hnojivu prakticky identický jako v původní kalové vodě (Tab. 2 a 4), což je dáno tím, že draslík se v podstatě neúčastní chemických reakcí probíhajících v důsledku dávkování srážecích činidel a odchází ze systému s „odpadním proudem“ po zpracování kalové vody. Významný nárůst obsahu Ca, Mg a S v produktu (Tab. 2 a 4) je způsoben jejich přidavkem se srážecími činidly. Snížení obsahu sloučenin dusíku v kapalně frakci hnojiva oproti původní kalové vodě (z 643 mg/l v kalové vodě na 350 mg/l v kapalně frakci hnojiva) je patrně způsobeno odvětráváním amoniaku při vysoké hodnotě pH (Pitter, 1999). Vysoké zastoupení sloučenin dusíku v pevné frakci hnojiva (cca 89,0 %) naznačuje výskyt struvitu, resp. $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, v produktu, což patrně souvisí s přidavkem iontů Mg^{2+} ve srážecích činidlech (Münch et Barr, 2001). Na druhou stranu diskutované množství N představuje pouze cca 6,6 % z množství N přítomného ve zpracovaném množství kalové vody. Z toho je zřejmé, že (podobně jako u draslíku), většina N není do získaného hnojiva inkorporována. Obsah mikroprvků, potenciálně toxických prvků a dalších prvků v testovaném materiálu je shrnut v tabulkách 6 a 7. Pokud budeme hodnotit obsah vybraných rizikových prvků (Zn, Ni, As, Cd, Cr, Cu, Pb) jež jsou uváděny v tabulkách 6 a 7 s platnou národní legislativou (vyhláška č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva), tak veškeré vybrané prvky jsou výrazně pod limitními hodnotami. V některých případech lze konstatovat, že rizikové prvky byly analyzovány pod detekčním limitem daného měření.

Tab. 6. Obsah mikroprvků (v mg/l) v jednotlivých frakcích hnojiva.

Prvek	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Původní suspenze	201	0,371	0,000	2,47	0,043
Kapalná frakce	0,058	<0,005	<0,002	0,008	0,087
Pevná frakce	201	0,371	<0,002	2,46	0

Tab. 7. Obsah dalších prvků (v mg/l) v jednotlivých frakcích hnojiva.

Prvek	Ni	Na	Al	As	Cd	Cr	Pb
Původní suspenze	0,327	171	26,4	0,000	0,000	0,117	0,000
Kapalná frakce	<0,005	52,6	<0,05	<0,03	<0,001	<0,005	<0,02
Pevná frakce	0,327	118	26,4	<0,03	<0,001	<0,005	<0,02

4. ZÁVĚRY

- Efektivita převedení fosforu do sraženiny zvoleným postupem je vysoká, je možno garantovat minimálně 90 %.
- Vzhledem k použitým srážecím činidlům je produkt poměrně bohatý na další živiny, zejména na Ca a Mg.
- Realizovaný postup není schopen garantovat efektivní využití dusíku a draslíku obsažených v kalové vodě.
- Obsah rizikových prvků v získaném hnojivu je možno označit za velmi nízký.
- Vzhledem k vysoké hodnotě pH vyprodukovaného hnojiva je při jeho výrobě i při další manipulaci s ním potřeba počítat s poměrně masivním odvětráváním amoniaku do ovzduší.
- Využitelnost živin rostlinami obsažených v získaném hnojivu bude komplexně vyhodnocena po skončení vegetačních pokusů s kukuřicí, které aktuálně probíhají.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledky tohoto příspěvku byly získány v rámci aktivit spojených s řešením projektu TAČR č. SS07020258. Autoři tímto děkují poskytovateli dotace za finanční podporu.

SEZNAM LITERATURY

- Cordell D., Drangert J. O., White S. (2009). The story of phosphorus : Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, p. 292 – 305.
- Holba, M., Plotěný, M., Maršálková, E., Maršálek, B. (2011). Klady a zápory technologických procesů pro recyklaci a odstranění fosforu z povrchových a odpadních vod. *Sborník přednášek ŘEŠENÍ EXTREMNÍCH POŽADAVKŮ NA ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD*, p. 142-147, 24. – 25. 2., Blanko, Česká republika.
- Chudoba J., Dohányos M., Wanner J. (1991). *Biologické čištění odpadních vod*. SNTL, Praha.
- Karmann C., Mágrová A., Jeníček P., Bartáček J. Kouba V. (2024). Advances in nitrogen removal and recovery technologies from reject water: Economic and environmental perspectives. *Bioresour. Technol.* 391, 129888.
- Münch E. V., Barr K. (2001). Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Research*. 35 (1), p. 151- 159.
- Pitter P. (1999). *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT v Praze, Praha.
- Sýkorová E, Wanner J. Zvýšené odstraňování fosforu z odpadních vod. *Sborník přednášek ŘEŠENÍ EXTREMNÍCH POŽADAVKŮ NA ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD*, p. 18-27, 24. – 25. 2., Blanko, Česká republika.
- Vaněk V. a kol. (2016). *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press s. r. o., Praha.
- Nkoa R. (2013). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, p. 473–492.
- Cydzik-Kwiatkowska A., Nosek D. (2020). Biological release of phosphorus is more efficient from activated than from aerobic granular sludge. *Scientific Reports*, 10, 11076.
- Vyhláška č. 474/2000 Sb. *Vyhláška Ministerstva zemědělství o stanovení požadavků na hnojiva*.