

Produkce fosforečného hnojiva z kalové vody a vyhodnocení jeho využitelnosti ve výživě rostlin

Pavel Švehla, Martin Kulháněk, Lucie Houdková, Pavel Míchal, Helena Chládková, Stanislav Ház, Martin Pečenka, Vojtěch Kazda, Iveta Růžicková, Jiří Wanner, Pavel Tlustoš

Tento článek vyšel v časopise Vodní hospodářství, ročník 76, číslo 4/2026.

*Jakékoliv dotazy týkající se nakládání s tímto článkem z hlediska autorských a vlastnických práv směrujte prosím na **stransky@vodnihospodarstvi.cz***



***vodní
hospodářství®***

www.vodnihospodarstvi.cz

Produkce fosforečného hnojiva z kalové vody a vyhodnocení jeho využitelnosti ve výživě rostlin

Pavel Švehla, Martin Kulháněk, Lucie Houdková,
Pavel Míchal, Helena Chládková, Stanislav Ház,
Martin Pečenka, Vojtěch Kazda, Iveta Růžicková, Jiří Wanner,
Pavel Tlustoš

Abstrakt

V rámci tohoto příspěvku jsou shrnuty výsledky experimentů zaměřených na zpracování kalové vody vznikající při odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu za účelem přípravy fosforečného hnojiva. Proces zisku hnojiva zahrnoval úpravu pH pomocí $\text{Ca}(\text{OH})_2$, koagulaci s přidávkou MgSO_4 , následnou flokulaci, separaci sráženiny prostou sedimentací a gravitační zahuštění, což vedlo ke vzniku produktu charakteru suspenze. Celková sušina získaného hnojiva činila cca 14,2 %. Objem výsledného produktu představoval cca 1,5 % objemu původní kalové vody, přičemž v tomto produktu bylo zakonzentrováno více než 90 % fosforu původně obsaženého v kalové vodě. Obsah fosforu v sušině produktu představoval cca 6,1 %. Díky chemické podstatě použitých srážedel bylo získané hnojivo bohaté i na vápník a hořčík. Dobrá využitelnost produktu ve výživě rostlin byla potvrzena v rámci vegetačních experimentů s kukuřicí, které mimo jiné prokázaly jeho významný vliv na produkci biomasy pěstovaných rostlin.

Klíčová slova

kalová voda – cirkulární ekonomika – recyklace živin – fosfor – srážení – výživa rostlin

Úvod

V posledních letech jsou stále více uplatňovány myšlenky cirkulární ekonomiky, jejímž hlavním cílem je zlepšovat stav životního prostředí a kvalitu lidského života pomocí zvyšování efektivity produkce v lidské společnosti [1]. V souvislosti s tím se při čištění odpadních vod mimo jiné postupně mění postoj k odstraňování základních živin, tedy dusíku a fosforu. Zatímco tradiční přístup k řešení tohoto problému je založen na optimalizaci procesů vedoucích k eliminaci znečištění bez ohledu na další osud sloučenin dusíku a fosforu odstraněných z vody, aktuálně je trendem maximalizace využití těchto prvků obsažených v odpadní vodě [2, 3, 4]. K tomuto přístupu bude provozovatele čistíren odpadních vod (ČOV) v budoucnu patrně motivovat i legislativa určující pravidla pro čištění odpadních vod. Zemědělské využití odpadních vod představuje zřejmě nejelegantnější a nejjednodušší možnost recyklace živin obsažených v odpadních vodách. Jedná se o velice diskutovanou a všeobecně podporovanou oblast. Přímé využití vyčištěné odpadní vody pro závlahu rostlin je jedním z nejčastěji aplikovaných postupů využívání odpadních vod v zemědělství [5]. Přes nesporné přínosy (a s vědomím rizik spojených zejména s potenciálním vnosem mikropolutantů do životního prostředí) je ale potřeba si také uvědomit, že vyčištěná odpadní voda je v rámci čistícího procesu v objektech ČOV paradoxně zbavena řady cenných složek, tedy zejména zmíněných minerálních živin, které jsou v procesu čištění vody považovány za prioritní polutanty.

Přes výše nastíněné změny v pohledu na sloučeniny dusíku a fosforu při čištění odpadních vod je zatím reálných aplikací postupů vedoucích k získání dále využitelných živin z odpadních vod, které mohou garantovat významnější produkci dobře uplatnitelných hnojiv, stále celosvětově velice málo. ČR v tomto směru rozhodně není výjimkou. Za účelem eliminace dusíkatého znečištění stále jednoznačně převládá aplikace kombinace biologických procesů nitrifikace a denitrifikace vedoucí ke „ztrátě“ dusíku v podobě elementárního N_2 . U fosforu ve většině případů dochází k jeho zabudování do čistíren-

ského kalu v důsledku jeho srážení v primárním či sekundárním čištění, popřípadě v důsledku zvýšeného biologického odstraňování při sekundárním čištění vody [6, 7]. Fosfor obsažený v kalu sice může být za předpokladu aplikace kalu na zemědělskou půdu využit, nicméně tomuto řešení často brání kontaminace kalu těžkými kovy, různými perzistentními organickými polutanty i mikropolutanty typu residuí léčiv, endokrinních disruptorů, mikroplastů atd. [8, 9]. V poslední době je zvýšená pozornost věnována také šíření genů antibiotické resistance v souvislosti s provozem čistíren odpadních vod [10], přičemž důležitou roli z pohledu tohoto problému může mít i aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu, u které pak tato skutečnost představuje další environmentální riziko.

Jedním z hlavních důvodů pomalého transferu technologií umožňujících efektivní recyklaci živin do čistírenské praxe je poměrně nízká koncentrace živin ve splaškových vodách, které z hlediska množství představují nejvýznamnější proud odpadních vod. Právě nízká koncentrace silně omezuje efektivitu procesů, které mají potenciál živiny z odpadní vody při jejím čištění získat, a dochází k různým technickým problémům. Na druhou stranu, každá velká městská ČOV s anaerobní stabilizací kalu představující dominantní technické řešení kalového hospodářství pro tuto kategorii ČOV produkuje při odvodňování stabilizovaného kalu takzvanou kalovou vodu. Koncentrace živin v této vodě je mnohonásobně vyšší než ve splaškové vodě a možnosti aplikace „recyklačních technologií“ zaměřených na jejich získávání jsou pro tuto vodu výrazně širší. Kalová voda je v obecnější rovině kapalnou frakcí produkovanou při zahušťování, resp. odvodňování kalu vznikajícího při čištění odpadní vody. Vlastnosti kalové vody jsou velice variabilní a závisí na vlastnostech čištěné vody a na postupech zpracování kalu před jeho zahuštěním, resp. odvodněním. Důvodem specifických vlastností výše zmíněného konkrétního typu kalové vody produkované při zahušťování a odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu je uvolňování sloučenin dusíku, fosforu, draslíku i dalších prvků v důsledku mineralizace organické hmoty kalu při anaerobní stabilizaci kalu [6, 11]. V dalším textu tohoto příspěvku bude pod pojmem „kalová voda“ již míněna právě voda vznikající při zahušťování a odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu.

Tradičním přístupem k nakládání s kalovou vodou je její navracení do hlavní linky čištění. Toto řešení však vzhledem k vysokému obsahu sloučenin N a P v kalové vodě může do značné míry komplikovat funkci ČOV z pohledu celkové efektivity odstranění těchto prvků, které jsou považovány za prioritní polutanty odpadních vod čištěných ve velkých městských ČOV. Řešení těchto problémů může přinést oddělené čištění kalové vody mimo hlavní linku ČOV [11, 12]. V České republice není aktuálně oddělenému čištění kalové vody věnována významnější pozornost. Ve světě se již více než dvě desítky let objevují tendence tento přístup aplikovat, přičemž nejznámější postupy odděleného 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 odděleného čištění kalové vody umožňující dusík získávat pro jeho následné zemědělské využití. Jako perspektivní se v tomto směru jeví zejména stripování amoniaku [12]. 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 [13], přičemž zásoby hornin, které slouží jako dominantní zdroj pro výrobu minerálních fosforečných hnojiv, mohou být vyčerpány i dříve než za 100 let [14]. Fosfor obsažený v kalové vodě může být v různé podobě vysrážen a následně odseparován vhodným mechanickým procesem. Nejčastěji využívaným srážedlem jsou obecně při čištění odpadních vod přítomné železitě ionty [6, 15]. Dostupnost produktů tohoto srážení pro rostliny je však velice omezená [16]. Často diskutovaným řešením je produkce struvitu, tedy hexahydrátu fosforečnanu amonno-hořečnatého, při čištění odpadních vod např. [17, 18, 19]. Přestože je struvit z pohledu výživy rostlin velice zajímavým zdrojem hned tří základních živin (P, N, Mg), které se z něj po aplikaci na půdu pozvolna uvolňují, také jeho získávání z kalové vody či jiných typů odpadních vod může být spojeno s různými problémy. Mezi ně za určitých okolností může patřit potřeba dosažení přibližně ekvimolárního obsahu amoniakálního dusíku, fosforu a hořčíku. Při spontánním neřízeném vzniku struvitu může také docházet k zanášení systémů čištění odpadních vod [20]. Jeví se tedy jako vhodné dále optimalizovat přístupy k získávání fosforu z kalové vody i jiných typů odpadních vod srážením z pohledu využitelnosti produktu rostlinami.

Cílem tohoto příspěvku je shrnout dosavadní výsledky v oblasti výzkumu zaměřeného na recyklaci fosforu obsaženého v kalové vodě za účelem jeho využití ve formě alternativního fosforečného hnojiva vykazujícího charakter suspenze. Pozornost bude věnována nejen obsahu živin v získaném produktu a jejich dostupnosti pro rostliny, ale také experimentálnímu ověření vhodnosti získaného hnojiva pro rostliny formou vegetačních pokusů.

Metodika provedených experimentů

V rámci výzkumu v oblasti zpracování kalové vody za účelem získání fosforečného hnojiva byly realizovány chemické srážecí testy. Pro tyto testy byla využita kalová voda produkovaná v objektu městské ČOV s kapacitou 30 000 EO. Základní charakteristiky použité kalové vody jsou uvedeny v **tab. 1**, obsah základních živin, resp. makroprvků, pak v **tab. 2**.

Pro srážecí testy byla volena činidla, která by svým složením obohatila vzniklé fosforečné hnojivo také o další živiny. Testy byly v jednotlivých fázích výzkumu provedeny s vápenným mlékem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dolomitem $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, síranem hořečnatým MgSO_4 , síranem železitým $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ se zvláštním důrazem na snahu o identifikaci optimálních variant jejich kombinací a identifikaci optimálních podmínek pro výrobu hnojiva. Po následné sedimentaci byl získán produkt zpracování kalové vody charakteru suspenze, který byl následně podroben experimentům za účelem ověření jeho vhodnosti využití jako alternativního fosforečného hnojiva. V rámci konkrétního experimentu popsaného v tomto příspěvku bylo zpracováno 297 l kalové vody, přičemž bylo získáno 4,5 l výsledného produktu. Za účelem produkce hnojiva byl aplikován následující postup jeho přípravy: úprava pH pomocí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na hodnotu 8,5, koagulace s dávkováním MgSO_4 v délce 1 min (přídavek 2,14 molárního přebytku Mg vůči P), 15minutová flokulace, 15minutová separace sraženiny prostou sedimentací, po které byla slita veškerá odsazená voda, závěrečné gravitační zahuštění s postupným sléváním odsazené vody.

V produktu zpracování kalové vody byly provedeny analýzy základních parametrů (pH, celková sušina a její frakce – organická sušina, koncentrace nerozpuštěných látek – NL, rozpuštěných látek – RL a veškerých organických látek – VL_{org} , koncentrace N-amon v odstředěném vzorku atd.) postupy vycházejícími z publikace Horáková et al. [21]. Následně byl vzorek podroben prvkové analýze s důrazem na obsah základních živin, resp. makroprvků, i dalších prvků. Přitom byly samostatně hodnoceny vlastnosti původní suspenze a její kapalně frakce oddělené s využitím centrifugy. Z hodnot pro původní suspenzi a pro její kapalnou složku byl dopočítán obsah v pevné frakci. Pro účely odstředění byla využita odstředivka SIGMA 216P s rotorem 12139-H při 13 500 otáčkách po dobu 10 minut při 15 892 g. Samostatně byl hodnocen celkový obsah daného prvku, jeho frakce dostupná okamžitě rostlinám a frakce potenciálně dostupná rostlinám. Celkový obsah prvků byl kvantifikován po přidávku lučavky královské do vzorku a následnou analýzou s využitím ICP-OES. Za obsah rostlinám okamžitě dostupných prvků byl považován obsah zjištěný v kapalně frakci dané suspenze (v zásadě výluh materiálu ve vodě). Obsah potenciálně přístupných prvků byl stanoven výluhem v 0,2 mol/l kyselině octové, kdy byl zvolen poměr 1:10 (w:v) a doba třepání po dobu 60 min. Poté byl vzorek odstředěn po dobu 5 min. při 5 000 g a následovala analýza supernatantu prostřednictvím ICP-OES. Obsah dusíku byl stanoven metodou dle Kjeldahla. Celkový dusík byl extrahován koncentrovanou kyselinou sírovou za přítomnosti katalyzátoru (síran měďnatý, síran draselný a selen) po dobu jedné hodiny při 400 °C. Poté byl přístrojem Gerhard VapoDest dusík destilován a jímán v roztoku kyseliny borité a stanoven titračně na základě změn pH.

Následně byly provedeny nádobové vegetační pokusy, jejichž cílem bylo experimentálně ověřit vhodnost získaného hnojiva jako zdroje živin pro rostliny v reálných podmínkách. Nádobový pokus s kukuřicí byl založen 21. 5. 2025 ve vegetačních halách Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze. Do nádob s objemem 6 l bylo vždy naváženo 6 kg substrátu (zemina smíchaná s pískem v poměru 2:1). Pro pokus byly zvoleny 3 zeminy s různými vlastnostmi: Hartvíkov, Humpolec a Suchdol. Vzhledem k podobným tendencím výsledků u všech zemín byla pro účely této publikace zvolena půda ze stanoviště Humpolec (49°33'16"N, 15°21'2"E), kambizem, písčitohlinitá, 525 m n. m., průměrný roční úhrn srážek 665 mm a průměrná roční teplota 7,0 °C. Zemina byla proseta přes síto s otvory 1 cm. V **tab. 3** je uveden obsah přístupných živin ve směsi zeminy a písku před založením pokusu stanovený metodou Mehlich 3

Tab. 1. Základní vlastnosti použité kalové vody

Parametr	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

Živina (mg/l)	P	K	Ca	Mg	S	N
	134	148	54	6	9	643

Tab. 3. Obsah živin ve směsi zeminy a písku před založením pokusu (v mg/kg sušiny)

Makroprvky (mg/kg)	N	P	K	Ca	Mg	S
	-	61,7	74,1	705	68,1	9,33
Mikroprvky (mg/kg)	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Mo
	244	2,36	2,03	54,5	na	na

Tab. 4. Schéma pokusu s dávkami aplikovaných živin v g/nádobu (6 kg substrátu)

Varianta	N	P	K
Kontrola	0	0	0
$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	0,5	0,1	0,5
KV1	0,5	0,1	0,5
$\text{N}_1\text{P}_3\text{K}_1$	0,5	0,3	0,5
KV3	0,5	0,3	0,5

[22]. Tato metoda je v ČR i v zahraničí standardizována pro stanovení rostlinám přístupných makro i mikroprvků. Dle zjištěného obsahu lze považovat obsah fosforu ve vstupním substrátu za vyhovující, obsah draslíku a hořčíku za nízký [23] a obsah síry za velmi nízký [24]. Obsah mikroprvků byl dle kritérií uvedených v publikaci Zbíral [25] následující: železo, měď, mangan – střední, zinek – nízký. Obsah molybdenu a bору se pohyboval pod hladinou detekce ICP-OES. Dále bylo stanoveno výměnné pH substrátu, jehož hodnota činila 5,2 (kategorie kyselé půdy). Obsah přístupného dusíku nebyl vzhledem k rychlým přeměnám N v půdě stanoven a dávky byly navrženy podle předpokládaného odběru N rostlinami.

V rámci sledování bylo založeno pět variant hnojení vždy ve třech opakováních: 1) nehněná kontrola (K0), 2) minerální NPK ($\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$), 3) suspenze získaná zpracováním kalové vody 1 (KV1), 4) minerální NPK ($\text{N}_1\text{P}_3\text{K}_1$), 5) suspenze získaná zpracováním kalové vody 3 (KV3). Dávky dodaných živin jsou uvedeny v **tab. 4**. Hlavním parametrem bylo množství dodaného N, P a K, kdy suspenze byla aplikována na základě obsahu fosforu, přičemž dusík a draslík byly doplněny v minerální formě za účelem dosažení stejných dávek N a K s kontrolní minerálně hnojenou variantou. Minerální dusík byl aplikován roztokem NH_4NO_3 , fosfor byl aplikován roztokem KH_2PO_4 , minerální draslík roztoky KCl a KH_2PO_4 . Do nádob bylo zaseto pět semen kukuřice do hloubky 3,5 cm. Po vzejití byly rostliny dne 3. 6. 2025 vyjednoceny na dvě na nádobu. Nádobky byly průběžně randomizovány (4. 6., 16. 6. a 29. 6.) za účelem vyloučení vlivu vnějších podmínek. Sklizeň proběhla dne 15. 7. 2025. Během sklizně byla měřena výška rostlin a výnos nadzemní biomasy. Biomasa byla poté usušena za účelem zjištění výnosu sušiny a namleta střížným mlýnem se sítem s velikostí ok 1 mm. Dále byly odebrány půdní vzorky, které byly usušeny při laboratorní teplotě a přesety přes 2 mm síto.

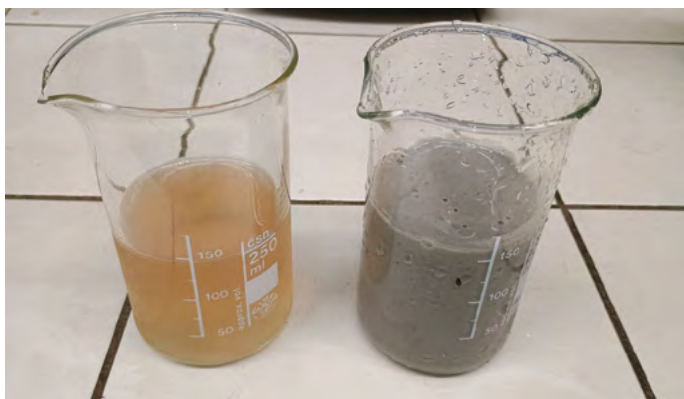
Výsledky a diskuse

Základní vlastnosti získaného hnojiva

Přídavek srážedel do kalové vody a další výše nastíněný postup jejího zpracování vedl k získání produktu charakteru suspenze. Jak již bylo uvedeno v metodické části, zpracováním 297 l kalové vody bylo získáno 4,5 l finálního produktu. Objem získané suspenze tak představuje pouze cca 1,5 % původního objemu zpracovávané kalové vody. Na **obr. 1** je uvedena fotografie dokumentující vzhled produktu.

Základní charakteristiky získaného hnojiva jsou shrnuty v **tab. 5**.

Významná redukce objemu produktu ve srovnání s použitou kalovou vodou je pozitivní a díky ní bylo dosaženo i poměrně vysokého obsahu celkové sušiny v suspenzním hnojivu. Ten dosáhl cca 14,2 %, resp. 142 g/l. Nerozpuštěné látky představují více než 96 % celkové



Obr. 1. Fotografie kádinky s použitou kalovou vodou (vlevo) a kádinky se získaným hnojivem (vpravo)

sušiny hodnocené suspenze. Cca 11% zastoupení organických látek v celkové sušině naznačuje, že do výsledné sraženiny přechází významná část organických látek obsažených původně v kalové vodě. Těmito látkami může být tedy produkt z určitého pohledu „znečištěn“. Hodnota pH hnojiva (8,8) je oproti původní kalové vodě (8,0) vyšší. To je patrně způsobeno přidávkou alkalických činidel při přípravě hnojiva z kalové vody. V každém případě je v této souvislosti potřeba počítat se zvýšeným zastoupením těkavého nedisociovaného amoniaku v rámci Namon [26], který se může uvolňovat do okolní atmosféry, a s tím spojenými zdravotními a environmentálními riziky. V případě transferu řešeného procesu do poloprovozního, resp. plně provozního měřítka je potřeba s tímto počítat.

Obsah fosforu a dalších základních živin v hnojivu

Obsah fosforu a dalších základních živin, resp. makroprvků, v původní suspenzi vyjádřený v mg na 1 l získané suspenze je k dispozici v tab. 6. Za účelem komplexnějšího vyhodnocení výsledků jsou v tab. 7 vyhodnoceny i koncentrace těchto prvků vztahované na obsah sušiny vyprodukovaného hnojiva uváděné v mg/kg_{sušiny}, které jsou u kapalných materiálů ve výživě rostlin běžně používány.

Obsah fosforu ve výsledné suspenzi činil cca 0,87 %, resp. 8,7 g/l. Pokud vyjádříme jeho procentuální obsah v sušině, dojdeme k hodnotě cca 6,1 %. Celkový obsah fosforu vztahovaný na sušinu hnojiva je tak významně vyšší než v běžně používaných „alternativních“ prostředcích sloužících jako zdroj živin pro výživu rostlin. Nkoa et al. [27] například uvádějí obsah fosforu v sušině digestátu z bioplynových stanic v rozmezí 0,2–3,5 %. Cydzik-Kwiatkowska et Nosek [28] zmiňují podobný rozsah obsahu celkového fosforu pro anaerobně stabilizovaný čistírenský kal (2,6–3,4 %). Uvážíme-li, že například obsah fosforu v běžných komerčních fosforečných hnojivech (např. v jednoduchém či v dvojitěm superfosfátu) dosahuje okolo 17–21 % (vyjádřeno jako P₂O₅, tedy okolo cca 7–9 % P), dojdeme ke zjištění, že zastoupení P v sušině získané suspenze je poměrně vysoké a výsledky je z tohoto pohledu možno označit za velmi nadějně.

Obsah P v kalové vodě dosahoval 134 mg/l (tab. 2). Celkový obsah P ve zpracovaném množství kalové vody (297 l) tedy dle provedených analýz činil 39 800 mg, resp. 39,8 g. Objem produktu, ve kterém byl zakonzentrován hlavní podíl P, představoval cca 1,5 % původního objemu zpracované vody. Pokud budeme vycházet z celkového obsahu P v produktu (8 690 mg/l) zjištěného v získané suspenzi, dojdeme při objemu produktu 4,5 l k celkovému obsahu P 39,1 g, což představuje výtěžnost cca 98,2 %. Také nízká odtoková koncentrace P v kalové vodě oddělené od produktu (v popisované sérii experimentů 10,8 mg/l při koncentraci v kalové vodě 134 mg/l) svědčí o vysoké efektivitě separace P z kalové vody dosahující za daných podmínek cca 91,9 %.

Z hodnot uvedených v tab. 6 a 7 je zřejmé, že podíl rostlinám okamžitě dostupného fosforu na celkovém obsahu P je minimální. To je

Tab. 5. Základní charakteristiky získaného hnojiva

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

dáno nízkou rozpustností produktů sražení a s ní souvisejícím nízkým obsahem P v kapalně frakci hnojiva (tab. 7). Na druhou stranu je však poměrně významné zastoupení potenciálně dostupného fosforu, představující cca 8,1 % z celkového obsahu. Z tohoto pohledu je možno očekávat, že získané hnojivo by po jeho aplikaci na zemědělskou půdu mohlo umožňovat podobně jako například struvit [17] postupné uvolňování fosforu a vysokou efektivitu jeho využití rostlinami.

Celkový obsah draslíku kvantifikovaný v mg/l získané suspenze je v produktu sražení vyšší než v původní kalové vodě (246 oproti 148 mg/l, tab. 6 a 2), což svědčí o možnosti přechodu menšího množství draslíku do sraženiny. Významný nárůst celkového obsahu Ca, Mg a S v produktu oproti kalové vodě (cca o 2 až 3 řády) je způsoben jejich přidávkou se sražecími činidly. Uvážíme-li, že při přípravě hnojiva bylo do 297 l kalové vody přidáno 241 g Ca a 68 g Mg, dojdeme ke zjištění, že v případě Ca bylo v získaném produktu obsaženo cca 75,1 % Ca vstupujícího do procesu přípravy hnojiva (obsah v kalové vodě + přidávek ve formě použitých činidel). U Mg pak jeho zachycené množství představuje cca 39,1 % z množství vstupujícího do procesu. Nelze tedy vyloučit významnější úniky sražedel v průběhu přípravy hnojiva. Jejich přesnější kvantifikace bude předmětem navazujícího výzkumu. Síra jakožto další živina byla v rámci řešeného experimentu zachycena v produktu pouze v množství představujícím cca 2,1 % z množství vstupujícího do procesu (obsah v kalové vodě + přidávek ve formě MgSO₄). Amoniakální dusík představuje dominantní formu N v kalové vodě i v získaném produktu jejího zpracování. Celkový obsah dusíku v získaném produktu je téměř pětikrát vyšší než v původní kalové vodě. To jednoznačně prokazuje zachycení určitého množství dusíku do získaného hnojiva.

Z hlediska výživy rostlin je na základě složení hnojivo možno doporučit zejména do půd s kyselým až neutrálním výměnným pH (přibližně 5,0 až 7,0) s dostatečnou zásobou draslíku. Poměr potenciálně přístupného vápníku a hořčíku (přibližně 3,7:1) je vhodný pro většinu půd. Celkový obsah fosforu vztahovaný na objem je 0,87 %. Průměrná potřeba P se u rostlin pohybuje v rozmezí 15–30 kg/ha. K doplnění této dávky by tak bylo třeba aplikovat přibližně 1 700 až 3 500 litrů hnojiva na hektar.

Distribuce základních živin v jednotlivých frakcích hnojiva

V tab. 8 je naznačena distribuce makroprvků v jednotlivých frakcích hnojiva. Z uvedených údajů je zřejmé, že prakticky veškerý fosfor (více než 99,9 %) je obsažen v pevné frakci hnojiva. To je logické vzhledem k tomu, že principem přípravy hnojiva bylo jeho vysrážení z kalové vody, tedy převedení do pevné frakce. Čistě z pohledu obsahu fosforu jakožto hlavního zájmového prvku by tedy přicházela v úvahu

Tab. 6. Obsah makroprvků (v mg/l) v hnojivu

Prvek	P	K	Ca	Mg	S	N
Celkový obsah	8 690	246	42 900	6 060	523	3 180
Okamžitě dostupný	5,56	157	111	20,4	304	347
Potenciálně dostupný	703	90,6	11 000	2 960	110	-

Tab. 7. 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
Potenciálně dostupný	4 950	638	77 464	20 845	775	-

Tab. 8. Obsah makroprvků (v mg/l) v jednotlivých frakcích hnojiva

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

možnost strojního zahuštění/odvodnění produktu za účelem dalšího zvýšení obsahu živiny v produktu a zároveň minimalizace celkového objemu produktu.

Podobná situace jako u fosforu je z hlediska distribuce prvků mezi jednotlivé frakce hnojiva u hořčíku a u vápníku. I tyto prvky jsou jakožto použitá srážedla v souladu s předpoklady zastoupeny téměř výhradně v pevné frakci.

Síra je obsažena z větší části v kapalné frakci, uvážíme-li navíc objem produktu 4,5 l při objemu zpracovávané kalové vody 297 l, je zřejmé, že naprosto majoritní většina této živiny odchází se supernatantem odděleným od produktu při jeho zahušťování a nelze počítat s její významnější inkorporací do finálního suspenzního hnojiva (viz výše). Distribuce draslíku mezi jednotlivé frakce je srovnatelná se sírou. Původ tohoto prvku je však čistě v použité kalové vodě, nikoliv v přidávaných srážedlech. Příčinou nízkého zastoupení draslíku v pevné frakci je skutečnost, že tento prvek se v podstatě neúčastní chemických přeměn probíhajících v důsledku dávkování srážecích činidel a odchází ze systému s kapalným „odpadním proudem“ po zpracování kalové vody. Výsledky experimentů jednoznačně potvrzují původní předpoklad, že zvolený způsob produkce hnojiva neumožní draslík jakožto jednu ze základních živin efektivně zachytit do finálního produktu zpracování kalové vody.

Amoniakální dusík představuje dominantní formu N v kalové vodě i v získaném produktu jejího zpracování. Snížení obsahu sloučenin dusíku v kapalné frakci hnojiva oproti původní kalové vodě (z 643 v kalové vodě na 347 mg/l v kapalné frakci hnojiva) je patrně způsobeno zejména odvětráváním amoniaku při vysoké hodnotě pH [26]. Vysoké zastoupení sloučenin dusíku v pevné frakci hnojiva (cca 89,0 %) naznačuje výskyt tohoto prvku ve sraženině, patrně ve formě struvitu, což pravděpodobně souvisí s přidávkou iontů Mg^{2+} ve srážecích činidlech [17, 29]. Na druhou stranu, pokud zohledníme skutečnost, že bylo zpracováno 297 l kalové vody, činí při objemu produktu 4,5 l obsah N v pevné frakci cca 12 700 mg, resp. 12,7 g, což 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. Přesto se transformace N do sraženiny může vedle zmíněného odvětrávání amoniaku v menší míře projevit na výše diskutovaném poklesu zastoupení N v kapalné frakci hnojiva ve srovnání s původní kalovou vodou.

Obsah mikroprvků a rizikových prvků

Obsah mikroprvků a rizikových prvků v testovaném materiálu je shrnut v **tab. 9 a 10**. Z mikroprvků potřebných pro rostliny v podstatně menším množství než makroprvky diskutované výše [13] je v získaném hnojivu nejvýznamněji zastoupeno železo, které se nachází zejména v pevné frakci. Na základě získaných výsledků však v obecné rovině nelze předpokládat, že produkt získaný zpracováním kalové vody by mohl sloužit jako významnější zdroj mikroprvků.

Obsah nejvýznamnějších rizikových prvků, mezi které se paradoxně řadí i Zn a Cu zahrnuté ve výživě rostlin mezi mikroprvky, v testovaném vzorku hnojiva je velice nízký, ve většině případů byl pod detekčním limitem daného stanovení. Pokud ho budeme konfrontovat s platnou národní legislativou (vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva) [30], dojdeme ke zjištění, že hodnoty jsou výrazně pod požadovanými limity. Je tedy možno konstatovat, že aplikace získaného hnojiva na zemědělskou půdu je z pohledu obsahu těžkých kovů bezpečná. Dalším mikropolutantům bude věnována pozornost v navazující fázi výzkumu. Hlavním faktorem determinujícím obsah rizikových prvků v produktu je však samozřejmě obsah těchto prvků ve zpracovávané kalové vodě. Proto při zpracování kalové vody z různých zdrojů, resp. z různých ČOV v různém čase, nelze v závislosti na místních podmínkách na základě získaných výsledků zvýšený obsah diskutovaných prvků vyloučit.

Výsledky vegetačních pokusů

Na **obr. 2** jsou zobrazeny rostliny kukuřice z vybraných reprezentativních opakování. Je zde patrný vyšší vzrůst rostlin na hnojených variantách. Varianty KV1 i KV3 přitom vykazují podobný vzrůst jako relevantní kontroly $N_1P_1K_1$ a $N_1P_3K_1$. Dá se tedy usuzovat, že hnojivo získané zpracováním kalové vody je vhodné pro použití ke hnojení kukuřice. To

Tab. 9. 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. 10. Obsah rizikových prvků (v mg/l) v jednotlivých frakcích hnojiva

Prvek	Ni	As	Cd	Cr	Pb
Původní suspenze	0,327	0,000	0,000	0,117	0,000
Kapalná frakce	<0,005	<0,03	<0,001	<0,005	<0,02
Pevná frakce	0,327	<0,03	<0,001	<0,005	<0,02

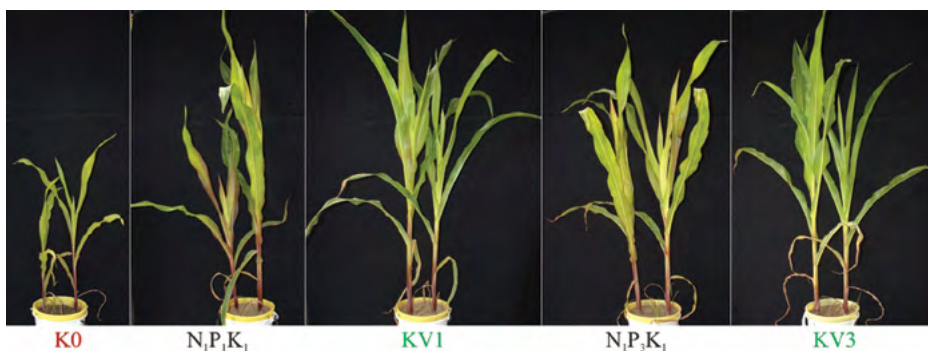
se potvrdilo i u rostlin pěstovaných na půdě odebrané na ostatních stanovištích. Dále to potvrzuje i naměřená výška rostlin (**obr. 3**).

Z **obr. 3** je dále patrné, že rostliny hnojené produktem získaným zpracováním kalové vody jsou v obou případech mírně vyšší než rostliny relevantních kontrolních variant. Výsledky však nejsou statisticky průkazné.

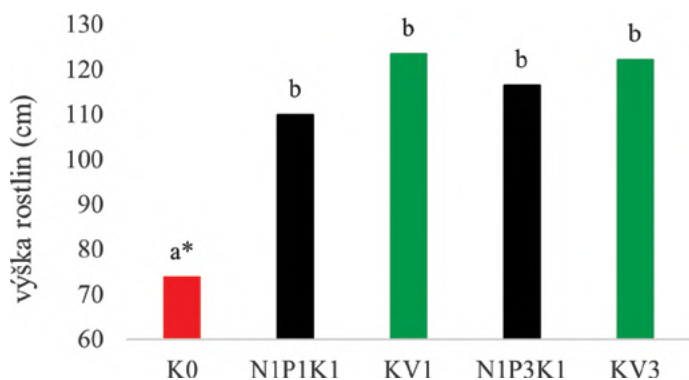
Obr. 4 znázorňuje výnos sušiny nadzemní biomasy kukuřice. Nejnižších hodnot opět dosáhla nehnojená kontrola. Ve srovnání s touto kontrolou byly výnosy u všech zbylých variant několikanásobně vyšší. Varianty $N_1P_1K_1$, KV1 a $N_1P_3K_1$ dosahovaly statisticky podobných výsledků. Průkazně nejvyšší výnos sušiny byl zaznamenán u variant KV3. Ukazuje se tak, že využití hnojiva získaného zpracováním kalové vody je pro kukuřici perspektivní alternativou minerálního hnojení. V současné době probíhají analýzy odebraných půdních a rostlinných vzorků na obsah živin. Jejich výsledky budou předmětem samostatného publikačního výstupu zaměřeného čistě na výsledky experimentů s rostlinami.

Závěr

Zpracováním kalové vody založeným na přidávce srážedel na bázi vápníku a hořčíku je možno získat suspenzi využitelnou jako fosforečné hnojivo. Efektivita převedení fosforu z kalové vody do tohoto hnojiva je vysoká a za podmínek zvolených v rámci realizovaného postupu je možno garantovat minimálně 90 %. Poměrně vysoký obsah celkové sušiny v hnojivu dosahující za daných podmínek 14,2 % umožnil snížit objem produktu na cca 1,5 % z původního objemu zpracovávané kalové vody. Vzhledem k použitým srážecím činidlům je získané hnojivo bohaté na další živiny, zejména Ca a Mg. Realizovaný postup neumožňuje plné využití dusíku a draslíku obsažených ve zpracovávané kalové vodě. Nedochází ani k významnějšímu zachycení síry přidané ve srážecích činidlech do finálního produktu. Obsah rizikových prvků v získaném hnojivu byl v daných podmínkách velmi nízký, bude ale silně záviset na vlastnostech zpracovávané kalové vody. Využitelnost živin obsažených v získaném hnojivu byla potvrzena v rámci vegetačních pokusů s rostlinami. Zde se potvrdila vhodnost aplikace suspenze pro kukuřici. Výška rostlin i výnosy sušiny byly vždy vyšší ve srovnání s relevantními minerálně hnojenými kontrolami. V případě výnosu sušiny varianty KV3 se dokonce jednalo o statisticky průkazný rozdíl.

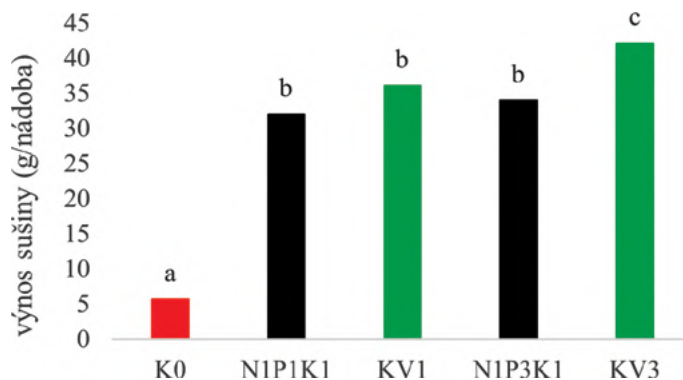


Obr. 2. Nádobový pokus – vybraná reprezentativní opakování



Obr. 3 Průměrná výška rostlin v cm

* Mezi variantami označenými rozdílnými písmeny je statisticky průkazný rozdíl (ANOVA, Tukey test; $p < 0,05$)



Obr. 4. Průměrné výnosy sušiny nadzemní biomasy kukuřice v g na nádobu

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

Literatura/References

- [1] Stahel, W. R. (2016). Circular economy. *Nature*. 531. 435–438.
- [2] Sýkorová, E.; Wanner, J. (2011). Zvýšené odstraňování fosforu z odpadních vod. Sborník přednášek řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod, CzWA, 24.–25. 2. 2011.
- [3] Sallu, T. D.; Oladoja, N. A. (2021). Nutrient recovery from wastewater and reuse in agriculture: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19:2299–2316.
- [4] Rey-Martínez, N.; Torres-Sallan, G.; Morales, N.; Serra, E. (2024). Combination of technologies for nutrient recovery from wastewater: A review. *Clean Waste Syst.* 7. 100139.
- [5] Hashem, M. S.; Qi, X. (2021). Treated Wastewater Irrigation—A Review. *Water*. 13. 1527.
- [6] Chudoba, J.; Dohányos, M.; Wanner, J. (1991). Biologické čištění odpadních vod. SNTL Praha.
- [7] Rout, P. R.; Shahid, M. K.; Dash, R. R.; Bhunia, P.; Liu, D. Z.; Varjani, S.; Zhang, T. C.; Surampalli, R. Y. (2021). Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies. *J. Environ. Manage.* 296. 113246.
- [8] Latosinska, J.; Kowalik, R.; Gawdzik, J. (2021). Risk Assessment of Soil Contamination with Heavy Metals from Municipal Sewage Sludge. *Appl. Sci. (Basel)*. 11(2). 548.
- [9] Bolesta, W.; Głodniok, M.; Pieczonka, M.; Styszko, K. (2021). Antibiotics and endocrine disruptors in sewage sludge samples in terms of its agriculture use. *Desalination water treat.* 232: 280–297.
- [10] Mílobedzka, A.; Ferreira, C.; Vaz-Moreira, I.; Calderón-Franco, D.; Gorecki, A.; Sabina Purkrtova, S.; Bartacek, J.; Dziewit, L.; Singleton, C. M.; Nielsen, P. H.; Weissbrodt, D. G.; Manaia, C. M. (2022). Monitoring antibiotic resistance genes in wastewater environments: The challenges of filling a gap in the One-Health cycle. *J. Hazard. Mat.* 424. 127407.
- [11] 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.
- [12] Jeníček, P.; Švehla, P.; Zabranska, J.; Dohanyos, M. (2004). Factors affecting nitrogen removal by nitrification/denitrification. *Water Sci. Technol.* 49(5–6), 73–79.
- [13] Vaněk, V.; Balík, J.; Pavlík, M.; Pavlíková, D.; Tlustoš, P. (2016). Výživa a hnojení polních plodin (Profi Press s. r. o.). p. 224. ISBN: 978-80-86726-79-3.
- [14] Cordell, D.; Drangert, J. O.; White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Change*, 19, 292–305.
- [15] Cabo, A.; Gouveia, S.; Cameselle, C.; Lee, K. H. (2025). Phosphorus Removal by Chemical Precipitation in Wastewater Treatment Plants. *J. Chem.* 2025(1). 8608812.
- [16] Corona, M. E. P.; van der Klundert, I.; Verhoeven, J. T. A. (1996). *New Phytol.* 133(2). 2250–231.
- [17] Rahman, M. M.; Salleh, M. A. M.; Rashid, U.; Ahsan, A.; Hossain, M. M.; Ra, C. S. (2014). Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization - A Review. *Arab. J. Chem.* 7(1). 139–155.
- [18] Wu, H.; Venecckhaute, C. (2022). Nutrient recovery from wastewater: A review on the integrated Physicochemical technologies of ammonia stripping, adsorption and struvite precipitation. *Chem. Eng. J.* 433. 133664.
- [19] Guan, Q.; Li, Y. P.; Zhong, Y.; Liu, W.; Zhang, J. J.; Yu, X.; Ou, R. W.; Zeng, G. S.

(2023). A review of struvite crystallization for nutrient source recovery from wastewater. *J. Environ. Manage.* 344. 118383.

- [20] Le Corre, K. S.; Valsami-Jones, E.; Hobbs, P.; Parsons, S. A. (2009). Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 39(6), 433–477.
- [21] Horáková, M.; Janda, V.; Koller, J. (2003). Analytika vody. VŠCHT v Praze.
- [22] Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 15. 1409–1416.
- [23] Mühlbachová, G.; Kusá, H.; Vavera, R.; Káš, M. (2023). Použití diagnostických metod pro hodnocení přijatelných živin v půdě. Schválená metodika. VÚRV, v. v. i. (Praha), 46 s. ISBN: 978-80-7427-425-1.
- [24] Kulhánek, M.; Balík, J.; Sedlář, O.; Zbiral, J.; Smatanová, M.; Suran, P. (2018). Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3. Certifikovaná metodika (ČZU v Praze), 37 s. ISBN: 978-80-213-2893-8.
- [25] Zbiral, J. (2016). Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant – a proposal of critical values. *Plant Soil Environ.* 62: 527531.
- [26] Pitter, P. (2009). Hydrochemie. Vydavatelství VŠCHT v Praze.
- [27] Nkoa, R. (2013). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron. Sustain Dev.* 34, 473–492.
- [28] Cydzik-Kwiatkowska A.; Nosek D. (2020). Biological release of phosphorus is more efficient from activated than from aerobic granular sludge. *Sci. Rep.* 10, 11076.
- [29] Münch, E. V.; Barr, K. (2001). Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Res.* 35 (1), 151–159.
- [30] Vyhláška č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.¹⁾
 doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.¹⁾
 Ing. Lucie Houdková, Ph.D.²⁾
 Ing. Pavel Míchal, Ph.D.¹⁾
 Ing. Helena Chládková²⁾
 Ing. Stanislav Ház²⁾
 Ing. Martin Pečenka, Ph.D.³⁾
 Bc. Vojtěch Kazda³⁾
 Ing. Iveta Růžicková, Ph.D.³⁾
 prof. Ing. Jiří Wanner, DrSc.³⁾
 prof. Ing. Pavel Tlustoš¹⁾

¹⁾ ČZU v Praze
 Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin
 Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
 ČZU v Praze
 Kamýcká 129
 165 00 Praha–Suchbát

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

³⁾ VŠCHT Praha
 Ústav technologie vody a prostředí
 Fakulta technologie ochrany prostředí
 VŠCHT Praha
 Technická 5
 166 28 Praha 6

Production of phosphate-fertilizer from sludge liquor and evaluation of its applicability in plant nutrition (Švehla, P.; Kulhánek, M.; Houdková, L.; Míchal, P.; Chládková, H.; Ház, S.; Pečenka, M.; Kazda, V.; Růžičková, I.; Wanner, J.; Tlustoš, P.)

Abstract

In this paper, the results of the experiments focused on the sludge liquor treatment enabling the production of phosphate-fertilizer are summarized. Precipitation agents containing calcium and magnesium were added to the sludge liquor which led to the gaining of the product showing the properties of the suspension. Total solids content in the final product reached ca. 14.2%. The volume of the product represented ca. 1.5% of original volume of the sludge liquor

used where more than 90% of the phosphorus originally contained in the sludge liquor was concentrated into the product. Phosphorus content in the dry matter of the product reached ca. 6.1%. Simultaneously, thanks to the chemical nature of the precipitating agents used, gained fertilizer were rich in calcium and magnesium. Well applicability of the product in plant nutrition was verified within the vegetative experiments performed with maize. Beside other observations, positive influence of the fertilizer on biomass production of tested plants was proved.

Key words

sludge liquor – circular economy – nutrients recycling – phosphorus – precipitation – plant nutrition
