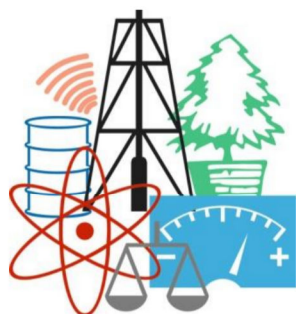


WASTE FORUM



ELECTRONIC PEER-REVIEWED AND OPEN-ACCESS JOURNAL ON
ALL TOPICS OF INDUSTRIAL AND MUNICIPAL ECOLOGY

RECENZOVANÝ ČASOPIS PRO VÝSLEDKY VÝZKUMU A VÝVOJE
Z OBLASTI PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ EKOLOGIE

YEAR 2025

No. 4

Pages 268 – 437

Patron of the issue / Patron čísla

ODPADOVÉ FORUM 2026 (21. – 23. 4. 2026, Hustopeče)

Symposium pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii



Czech Environmental Management Center 2025

OBSAH / INDEX

Úvodní slovo šéfredaktora / Editorial	271
Pro autory / For authors	272
Increasing the Efficiency of a Small Heat Source by Reusing its Waste Heat	273
Zvyšovanie účinnosti malých zdrojov tepla využitím ich odpadového tepla <i>Jozef JANDAČKA, Milan MALCHO, Patrik NEMEC, Ľudmila NOVÁ</i>	
Use of a low-temperature plasma reactor to reduce volatile organic compounds	282
Využití reaktoru s nízkoteplotním plazmatem k redukci těkavých organických látek <i>Jana SEIDLEROVÁ, Petr UNUCKA, Petr BĚČÁK, Michaela TOKARČÍKOVÁ, Roman GABOR</i>	
Tungsten dust as a significant waste from a nuclear fusion reactor	291
Wolframový prach jako důležitý odpad z jaderného fúzního reaktoru <i>Jaroslav STOKLASA, Lucie KARÁSKOVÁ NENADÁLOVÁ</i>	
Membránová destilace při nízkém teplotním materiálu a testování komerčně dostupných membrán	307
Low-temperature-gradient membrane distillation and testing of commercially available membranes <i>Zuzana HONZAJKOVÁ, Marek ŠÍR, Jiří HENDRYCH, Pavla TOMÁŠOVÁ, Marek DOLEŽEL</i>	
Laboratorní respirační testy a jejich význam v rámci nápravy ekologických zátěží	316
Laboratory-scale respiratory tests and their importance in reducing the environmental burden <i>Jana CHUMCHALOVÁ, Martin KUBAL, Tomáš LANK, Lucie ORAVOVÁ, Andrey BULKIN, Natálie JUSTOVÁ, Patricie MALÁ, Jiří HENDRYCH</i>	
Repair and filling mortars based on metallurgical waste	327
Sanační a výplňové malty na bázi metalurgických odpadů <i>Jana DAŇKOVÁ, Jana SEIDLEROVÁ, Adéla VALENTOVÁ, Petr BĚČÁK, Petr UNUCKA</i>	
Use of Magnetic and Non-Magnetic Fractions of Coal Ash in the Preparation of Glazes from Waste Materials	337
Využití magnetických a nemagnetických frakcí uhlénního popela pro přípravu glazury z odpadních materiálů <i>Michaela TOPINKOVÁ, Filip KOVÁR, Hana OVČAČÍKOVÁ</i>	
Using magnetic separation to recover iron from steel slag	347
Použití magnetické separace k získávání železa z ocelové strusky <i>Filip KOVÁR, Lucie BARTOŇOVÁ a Vlastimil MATĚJKA</i>	
Biomass ash as a potential material for civil engineering	354
Popílek z biomasy jako potenciální materiál pro stavebnictví <i>Karolína KRÁLOVÁ, Jan KONVALINKA, Klára BETÁKOVÁ, Martina ŠÍDLOVÁ, Petr FORMÁČEK, Rostislav ŠULC</i>	
Ověření využitelnosti odpadů jako náhrady elektricky vodivých plniv v cementových pastách	364
Verification of the usability of waste as a substitute for electrically conductive fillers in cement pastes <i>Vít ČERNÝ, Jindřich MELICHAR, Lenka MÉSZÁROSOVÁ</i>	
Vývoj alkalicky aktivovaného směsného pojiva s cílem minimalizace objemových deformací	373
Development of an alkaline activated mixed binder with the aim of minimizing volumetric deformations <i>Michal HIMMEL, Rostislav ŠULC</i>	

Studium metod měření hydratačního tepla popílků ze spoluspalování biomasy a alternativních sulfáto-vápenatých pojiv Study of methods for measuring the hydration heat of fly ash from biomass co-combustion and alternative sulfocalcic binders <i>Lukáš MAUERMANN, Klára BETÁKOVÁ, Martina ŠÍDLOVÁ, Jan KONVALINKA, Rostislav ŠULC</i>	383
Vliv odpadní celulózy na vlastnosti autoklávovaného pórobetonu The influence of waste cellulose on the properties of autoclaved aerated concrete <i>Lenka MĚSZÁROSOVÁ, Vít ČERNÝ, Jindřich MELICHAR, Šimon BARÁNEK, Jakub HODUL a Rostislav DROCHYTKA</i>	395
Možnosti využití plazmatické úpravy odpadního skla pro cementové kompozity s betonovým recyklátem Incorporation of Waste Glass into Cement-Based Composites <i>Matěj NOVOTNÝ, Zdeněk PROŠEK, Oleg BABČENKO, Pavel TESÁREK</i>	403
Food Waste Across Accommodation and Gastronomy in Czechia: Monitoring Practices in Accommodation Facilities and Waste-Related Customer Preferences in Restaurants Plýtvání potravinami v ubytovacích a gastronomických zařízeních v Česku: Postupy monitorování v ubytovacích zařízeních a preference zákazníků restaurací ve vztahu k plýtvání potravinami <i>Kateřina PROVAZNÍK RYGLOVÁ, Andrea KRÁLIKOVÁ*, Veronika BARTLOVÁ, Nikola MÁJKOVÁ, Marie VEČEŘOVÁ</i>	415
Racionální přístupy k nakládání s digestátem Reasonable Approaches to Digestate Handling <i>Pavel MÍCHAL, Pavel ŠVEHLA, Barbora KOUBKOVÁ, Jakub TEGEL, Pavel TLUSTOŠ</i>	427

Pozvánky a nekomerční prezentace / Invitations and non-commercial presentation

TVIP 2026 21. – 23. 4. 2026 Hustopeče – 1. cirkulář (Call for papers) Konference APROCHEM + symposium ODPADOVÉ FORUM 2026	436
---	------------

WASTE FORUM – recenzovaný časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii
WASTE FORUM – electronic peer-reviewed and open-access journal on all topics of industrial and municipal ecology
 ISSN: 1804-0195; www.WasteForum.cz. Vychází čtvrtletně.
 Vychází od roku 2008, od roku 2017 je indexován v databázi SCOPUS.
 Ročník 2025, číslo 4
 Vydavatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s., IČO: 45249741, www.cemc.cz
 Adresa redakce: CEMC, ul. 28. pluku 524/25, 101 00 Praha 10, ČR, fax: (+420) 274 775 869
 Šéfredaktor: Ing. Ondřej Procházka, CSc., tel.: (+420) 723 950 237, e-mail: prochazka@cemc.cz
 Redakční rada: Ing. Vratislav Bednařík, CSc.; doc. Ing. Vladimír Čablík, Ph.D.; prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc.; prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc.; prof. Ing. František Hrdlička, CSc.; Ing. Slavomír Hredzák, CSc.; doc. Ing. Emília Hroncová, Ph.D.; prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.; prof. Ing. František Kašánek, CSc.; prof. Ing. Mečislav Kuraš, CSc.; prof. Mgr. Juraj Ladomerský, CSc.; prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.; prof. Norbert Miskolczi; prof. Ing. Lucie Obalová, Ph.D.; Ing. Miroslav Punčochář, CSc., DSc.; Ing. Klára Slezáková, Ph.D.; Ing. Lenka Svecova, Ph.D.; doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.; prof. Ing. Lubomír Šooš, Ph.D.; prof. dr. hab. inž. Barbara Tora, doc. Ing. Hana Urbancová, Ph.D., DBA, doc. Ing. Pavla Vrabcová, Ph.D.
 Web-master: Ing. Vladimír Študent
 Redakční uzávěrka: 8. 10. 2025. Vychází: 4. 12. 2025

Racionální přístupy k nakládání s digestátem

Pavel MÍCHAL, Pavel ŠVEHLA, Barbora KOUBKOVÁ, Jakub TEGEL, Pavel TLUSTOŠ

Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie
a výživy rostlin, Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 – Suchbátka
e-mail: michalp@af.czu.cz

Souhrn

Příspěvek je zaměřen na shrnutí dosavadních poznatků v oblasti aplikace inovativních postupů zpracování digestátu produkovaného v rámci provozu zemědělských bioplynových stanic. Pozornost je věnována zejména racionalizaci využití živin obsažených v digestátu, možnosti eliminovat ztráty dusíku při manipulaci s digestátem a snížení jeho objemu za účelem minimalizace problémů při skladování a transportu. Hlavním cílem prezentovaného výzkumu je přitom identifikovat cesty, jak digestát co nejlépe využít ve výživě rostlin. Jsou shrnuty dosud získané výsledky laboratorních testů zaměřených na stripování amoniaku za účelem získání dusíkatého hnojiva a na nitrifikaci digestátu aplikovanou za účelem zamezení těkání amoniaku při skladování digestátu i při jeho aplikaci na zemědělskou půdu. Výsledky naznačují poměrně vysoký potenciál těchto postupů pro jejich budoucí aplikaci v provozním měřítku. Je také nastíněn plán navazujících aktivit, které by měly podpořit postupný transfer vyvíjených postupů do praxe. Ty budou zaměřeny na postupnou integraci obou zmíněných procesů a jejich vhodnou kombinaci s tepelným zahušťováním digestátu.

Klíčová slova: bioplynové stanice; digestát; emise amoniaku; stripování; nitrifikace; tepelné zahušťování

Úvod

Bioplynové stanice (BPS) jsou primárně provozovány s cílem transformovat odpadní organickou hmotu vznikající v zemědělství i v jiných odvětvích na energeticky využitelný bioplyn^{1,2,3}. Vedle tohoto hlavního produktu vzniká velké množství digestátu označovaného často jako fermentační zbytek. Ten je v zásadě odpadním produktem. Jedná se o materiál, který vzhledem ke své omezené biologické rozložitelnosti nepodlehne anaerobnímu rozkladu v biologickém reaktoru BPS - v tzv. fermentoru. Jde o heterogenní suspenzi o celkové sušině pohybující se obvykle v rozmezí 5 – 12 %³. Digestát obsahuje relativně velké množství živin. Z tohoto důvodu je zpravidla využíván ve výživě rostlin, aplikací na zemědělskou půdu. To platí zejména v případě zemědělských BPS, které jsou zpravidla provozovány přímo zemědělskými podniky. Tento přístup je v souladu s preferovanými myšlenkami cirkulární ekonomiky, kdy vedlejší produkty rostlinné i živočišné výroby jsou zpracovávány v BPS a zbytkový materiál (tedy právě digestát) je navrácen do cyklu hmoty v zemědělských systémech. Na druhou stranu je však tento zavedený přístup k nakládání s digestátem spojen s řadou problémů.

V podstatě nejcennější živinou obsaženou v digestátu je dusík. Ten se v něm vyskytuje dominantně ve formě amoniakálního dusíku (N-amon). N-amon přitom zahrnuje dvě disociační formy, kterými jsou amonný kationt (NH_4^+) a nedisociovaný amoniak (NH_3). Distribuce těchto dvou forem je dána podmínkami prostředí, zejména hodnotou pH a teplotou. Jelikož je digestát charakteristický mírně zásaditou hodnotou pH pohybující se obvykle v rozmezí mezi 7,5 a 8,5, je již za těchto podmínek zastoupení nedisociovaného NH_3 poměrně vysoké. Protože amoniak je těkavý, uniká z digestátu do ovzduší⁴, což je nežádoucí jak z environmentálního, tak z ekonomického hlediska, neboť dochází ke ztrátě živiny. K emisím amoniaku dochází při skladování digestátu i přímo při jeho aplikaci na půdu, resp. po jeho povrchové aplikaci^{5, 6, 7, 8}. Podíl ztrát N-amon je velice variabilní, obvykle představuje desítky procent z jeho množství obsaženého v surovém digestátu, dle některých zdrojů může celkově činit i 70 %^{9, 10, 11}. Z důvodu legislativních omezení možnosti aplikace digestátu na zemědělskou půdu

v zimním období a v souvislosti s ochranou vod před znečištěním způsobeným dusičnany ze zemědělských zdrojů^{12, 13}, je potřeba tento materiál před aplikací na zemědělskou půdu skladovat poměrně dlouhodobě. Vzhledem k tomu, že digestát je tvořen z cca 88 – 95 % vodou a s ohledem na zmíněné skutečnosti, jsou nároky na objem skladovacích prostor pro digestát velmi vysoké. Kromě výše zmíněných významných úniků amoniaku je tedy dlouhodobé skladování digestátu spojeno s vysokými náklady na výstavbu a provoz uskladňovacích nádrží. Přeprava velkého množství digestátu před jeho aplikací na zemědělskou půdu je nákladná, častý pohyb techniky při aplikaci na půdu vede k jejímu utužování a degradaci.

Digestát je v objektech některých BPS dále separován na kapalnou (fugát) a pevnou frakci (separát)³. Nakládání s fugátem je pak v podstatě identické jako v případě tekutého neseparovaného digestátu, je poměrně dlouhodobě uchovávan v uskladňovacích nádržích a následně aplikován na zemědělskou půdu. Dochází tedy v zásadě k identickým problémům zmíněným výše v souvislosti s nakládáním s neseparovaným digestátem. Separát nachází nejčastěji uplatnění jako stelivo v živočišné výrobě, může být využit také jako hnojivo, pěstební substrát, resp. jako jedna z jeho složek či může být kompostován. Také při manipulaci s ním dochází ke značným únikům amoniaku. V případě aplikace jako steliva je pak v důsledku emisí amoniaku ohroženo i zdraví hospodářských zvířat, popřípadě také personálu pohybujícího se v objektech, ve kterých jsou hospodářská zvířata ustájena. Ani v tomto případě pochopitelně nelze opominout environmentální aspekt emisí amoniaku do ovzduší.

Problémy spojené s nakládáním s neseparovaným digestátem i s jeho separovanými složkami je možno řešit vhodným způsobem úpravy digestátu. Přístupů k takové úpravě existuje celá řada, obvykle jsou ale po technické i ekonomické stránce velmi náročné^{3, 14}. Jako vcelku perspektivní se v tomto směru jeví metody založené na stripování amoniaku, biologické nitrifikaci a tepelném zahuštění, popřípadě jejich vhodná kombinace. Při stripování amoniaku, který se v závislosti na podmínkách ve zpracovávaném digestátu vyskytuje v rovnováze s amonným kationtem (rovnice 1), je možno z digestátu řízeným odvětráváním amoniaku a jeho následným zachycením v kyselém roztoku získat dusík v čisté podobě a zabránit tak jeho neřízenému úniku do ovzduší^{15, 16, 17, 18}. Dle použité kyseliny je možno získat roztok síranu či dusičnanu amonného, tedy látek, které jsou svojí podstatou minerálními dusíkatými hnojivy¹⁹ (rovnice 2a a 2b).



V případě, že po stripování v prostředí digestátu dojde k jeho separaci na fugát a separát, pak může dojít k eliminaci úniků amoniaku z těchto separovaných složek. Při nitrifikaci dochází k převedení N-amon na N-NO₃⁻, který není těkavý. Zároveň v digestátu při nitrifikaci dochází k poklesu pH. Díky tomu mohou být ztráty dusíku minimalizovány i v případě, že část N-amon nepodlehne nitrifikaci. I v tomto případě platí, že v případě separace digestátu až po proběhnutí nitrifikace budou fugát a separát z hlediska úniku amoniaku podstatně bezpečnější než v případě, že úprava není aplikována. Přitom v obou frakcích zůstane prakticky beze zbytku zachováno veškeré množství dusíku přítomného původně v digestátu a to ve formě přístupné rostlinám. Tepelné zahuštění může být využito k významné redukci objemu digestátu, resp. fugátu, a k řešení extrémních nároků na skladovací prostory pro tento materiál i na jeho transport. Omezeno může být utužování půdy způsobené pohybem techniky při aplikaci menšího objemu digestátu či jeho separovaných složek^{20, 21, 22}.

Možnostem zpracování digestátu za účelem racionalizace jeho využití dosud není věnována dostatečná pozornost. K úspěšné realizaci zmíněných postupů jako metod pro zpracování neseparovaného digestátu však mohou přispět dosavadní zkušenosti v oblasti zpracování fugátu postupem založeným na nitrifikaci fugátu a jeho následným tepelným zahuštěním. Již dříve bylo prokázáno, že nitrifikace představuje perspektivní možnost vedoucí k minimalizaci ztrát dusíku při manipulaci s fugátem¹⁴. Následný výzkum potvrdil, že ztráty dusíku při skladování nitrifikovaného fugátu jsou násobně nižší ve srovnání se skladováním surového (ne-nitrifikovaného) fugátu²³. Simulace dvoustupňové úpravy fugátu nitrifikací a následným tepelným zahuštěním nitrifikovaného fugátu v laboratorních podmínkách vedla ke zjištění, že prakticky veškeré živiny byly zakoncentrovány do

proudu tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu, přičemž v zásadě nedochází k jejich úniku do destilátu, který se jeví jako velice dobře využitelný jako procesní voda, například pro ředění substrátu vstupujícího do anaerobního reaktoru BPS^{14, 24}.

Cílem tohoto příspěvku je prezentovat prvotní výsledky výzkumu v oblasti zpracování neseparovaného digestátu, které navazují na aktivity spojené se zpracováním fugátu, tedy kapalné frakce fermentačního zbytku. Důraz tohoto výzkumu realizovaného v rámci projektu SQ01020303 je kladen právě na využití stripování amoniaku, nitrifikaci a tepelné zahuštění.

Experimentální část

Použitý digestát

K experimentům byl využit digestát z bioplynové stanice, která jako hlavní složky substrátu pro výrobu bioplynu využívá kukuřičnou siláž a hovězí kejdu, jako doplněk pak odpadní obilní šrot a v malém množství sezónně také zbytky brambor a zeleniny. Celková denní dávka výše uváděných surovin je obvykle 28 t, přičemž 17 t připadá zpravidla na kukuřičnou siláž, 10 t na hovězí kejdu a 1 t na obilní šrot. Technologie provozu dané BPS je založena na systému dvou biologických reaktorů – fermentoru, kde probíhá vlastní proces anaerobní fermentace, a „dofermentoru“, kde dochází k dokončování rozkladných procesů.

Základní vlastnosti použitého fermentačního zbytku jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1: Charakteristiky použitého digestátu

N-amon (mg/l)	5 230
sušina (%)	7,37
org. sušina (% ze sušiny)	73,1
CHSK* (g/l)	33,3

* chemická spotřeba kyslíku

Laboratorní simulace stripování amoniaku

Za účelem simulace procesu stripování digestátu byla zprovozněna stripovací kolona (obrázek 1 vlevo). Stripování bylo realizováno v různých podmínkách, přičemž pozornost byla věnována mimo jiné studiu vlivu intenzity proudění vzduchu stripovací kolonou na rychlost procesu a jeho efektivitu. První experiment byl proveden s využitím motorku HAILEA ACO-388D (příkon 70 W, průtok vzduchu 80 l/min) zajišťujícího provzdušňování zpracovávaného digestátu. Následný test byl pak uskutečněn pomocí výkonnějšího přístroje HAILEA ACO-500D (příkon 175 W, průtok vzduchu 275 l/min).

Průběh stripování byl hodnocen s využitím odběru vzorků zpracovávaného digestátu ve vhodných časových intervalech. Ve vzorcích byla následně stanovena koncentrace N-amon. Ve stripovací koloně byla v době odběru vzorku vždy měřena hodnota pH.

Laboratorní simulace nitrifikace

V laboratoři byl zároveň provozován nitrifikační reaktor zpracovávající digestát (obrázek 1, vpravo). Pracovní objem reaktoru činil 5 l. Průtok digestátu reaktorem byl kontinuální, přičemž systém pracoval na principu tzv. směšovací aktivace, resp. CSTR (Completely Stirred Tank Reactor)^{25, 26}. Digestát byl do reaktoru dávkován pomocí peristaltického čerpadla. Vstupující surový digestát byl ředěn pitnou vodou v poměru 1 : 4 (1 objemový díl fermentačního zbytku na 4 objemové díly vody). Ředění bylo realizováno za účelem prevence ucpávání hadiček transportujících digestát částicemi nerozpuštěných látek v něm obsažených. Další dvě peristaltická čerpadla do reaktoru přiváděla roztok NaOH (100 g/l) a odpěňovač BASF Burst EP 8100. Hodnota pH byla s využitím řídicího systému Magic XBC (GRYF HB) udržována v oblasti $6,0 \pm 0,1$, přičemž za tímto účelem byl do reaktoru na základě signálu řídicího systému

dávkován zmíněný roztok NaOH. Reaktor byl provzdušňován s využitím vzduchovacího motorku HAILEA ACO-328 (příkon 50 W, průtok vzduchu 70 l/min; koncentrace rozpuštěného kyslíku byla udržována na hodnotách přesahujících 4 mg/l). Při založení pokusu byl do celého objemu reaktoru přidán aktivovaný kal z proudu vratného kalu z městské čistírny odpadních vod vykazující požadovanou nitrifikační aktivitu, který sloužil jako inokulum, tedy zdroj nitrifikačních mikroorganismů pro zapracování reaktoru. Aktivovaný kal je pestrá směsná kultura zahrnující nejrozličnější skupiny mikroorganismů. Zastoupení nitrifikačních bakterií mezi nimi je přitom obvykle jen velmi omezené. Na druhou stranu je v aktivovaném kalu odebraném z ČOV, která prokazatelně dosahuje vysokou nitrifikační aktivitu, zastoupení nitrifikantů dostatečné pro inokulaci diskutovaného reaktoru. To bylo v rámci výzkumných aktivit autorského kolektivu opakovaně prokázáno při zapracování nitrifikačních reaktorů zpracovávajících nejrozličnějších kapalných materiálů s extrémně vysokým obsahem N-amoniaku¹⁴. Koncentrace nerozpuštěných látek v tomto kalu činila 10 g/l. Za popsaných podmínek bylo zahájeno dávkování digestátu do reaktoru, přičemž postup zahájení provozu reaktoru vycházel z přístupu popsaného v práci Michal et al.¹⁴.



Obrázek 1: Laboratorní stripovací kolona (vlevo); laboratorní nitrifikační reaktor (vpravo)

Analytické postupy

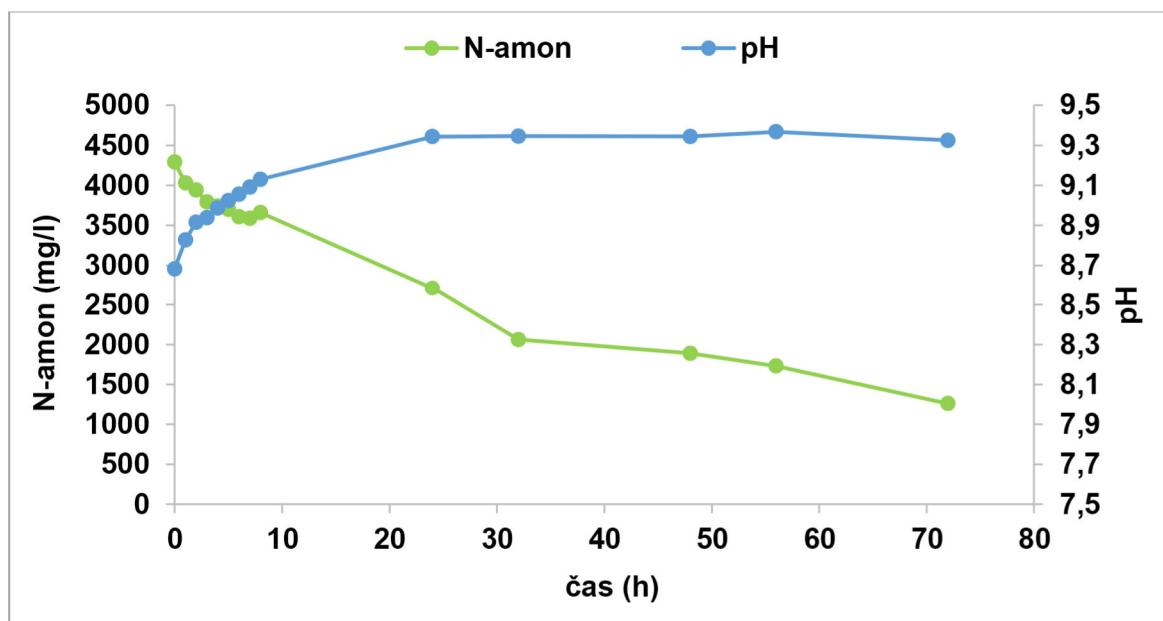
Veškeré rozborů vzorků surového digestátu i digestátu zpracovaného ve stripovací koloně, resp. v nitrifikačním reaktoru, (stanovení koncentrace jednotlivých forem dusíku, hodnota CHSK, obsah sušiny, resp. organické sušiny, atd.) byly podobně jako určování podmínek panujících v systémech zpracování digestátu (stanovení hodnoty pH, koncentrace rozpuštěného kyslíku atd.) realizovány v souladu s postupy uvedenými v publikaci Horáková et al.²⁷.

Výsledky a diskuse

Stripování amoniaku

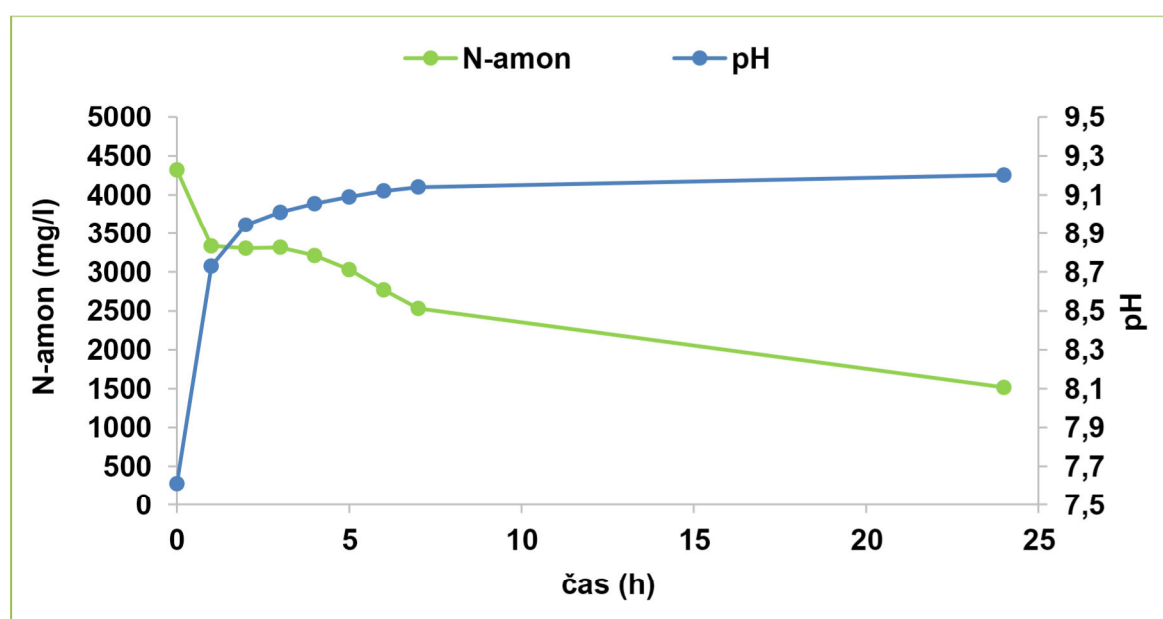
Na obrázku 2 je zaznamenán průběh prvního experimentu zaměřeného na simulaci stripování amoniaku z digestátu, který trval 72 hod. V původním digestátu činil obsah N-amoniaku 4290 mg/l, přičemž na konci testu dosahovala jeho koncentrace 1260 mg/l. Na počátku testu byla naměřena hodnota pH

cca 8,7. V prvních hodinách stripování pH poměrně rychle narůstalo, přičemž od měření po 24 hodinách již vykazovalo v zásadě stabilní hodnotu pohybující se okolo 9,3. Zaznamenaný nárůst hodnoty pH patrně souvisel s odvětráním CO_2 v prvních fázích stripování ²⁸.



Obrázek 2: Průběh stripování v rámci prvního experimentu

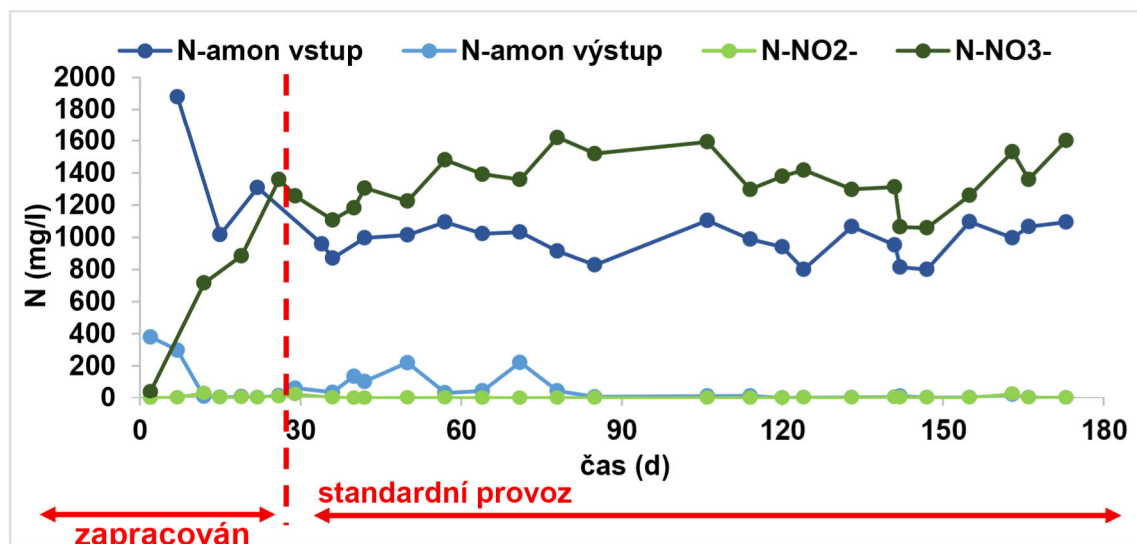
Výsledky druhého experimentu zaměřeného na stripování (obrázek 3) potvrzují, že zvýšení intenzity dávkování vzduchu do stripovací kolony urychluje proces ¹⁶. Již po sedmi hodinách byla koncentrace N-amon v digestátu snížena ze 4320 mg/l na 2530 mg/l, čímž bylo dosaženo 41 % účinnosti separace N-amon. Přitom při prvním experimentu taková účinnost nebyla zaznamenána ani po 24 hodinách. Také změny v hodnotě pH po zahájení procesu stripování byly podstatně rychlejší než v případě prvního experimentu. Již v průběhu první hodiny byl zaznamenán nárůst hodnoty pH z 7,6 na 8,7. Tato skutečnost může průběh procesu ještě sekundárně vylepšit díky rychlému zvýšení zastoupení těkavého NH_3 v rámci N-amon ^{18, 29}. Rozdíl mezi prvním a druhým experimentem v počáteční hodnotě pH je patrně dán tím, že byly zpracovávány dva samostatně odebrané vzorky digestátu.



Obrázek 3: Průběh stripování v rámci druhého experimentu

Nitrifikace

Obrázek 4 shrnuje vývoj koncentrace základních forem dusíku v nitrifikačním reaktoru v řešeném období jeho provozu. Obsah N-amon v digestátu ředěném vodou (viz metodika experimentů) vstupujícím do reaktoru činil průměrně 1030 mg/l. Hlavním produktem nitrifikace byl od počátku provozu reaktoru N-NO_3^- . Jeho koncentrace v odtoku z reaktoru se v první fázi zapracování reaktoru trvající v daných podmínkách 26 dnů postupně zvyšovala až na 1360 mg/l. Následně se ve fázi standardního provozu reaktoru pohybovala mezi 1060 a 1620 s průměrnou hodnotou 1350 mg/l.



Obrázek 4: Koncentrace jednotlivých forem dusíku na vstupu a výstupu nitrifikačního reaktoru

Postupný nárůst odtokové koncentrace N-NO_3^- ve fázi zapracování byl způsoben zahájením dávkování ředěného digestátu bohatého na N-amon a jeho transformací na N-NO_3^- , který se v prostředí reaktoru hromadil až do ustálení stavu typického pro fázi standardního provozu reaktoru. Je možno konstatovat, že zapracování reaktoru proběhlo úspěšně, přičemž bylo potvrzeno, že podobně jako v případě zpracování fugátu je možno regulací podmínek v reaktoru docílit rychlý start procesu i přes extrémní podmínky panující v reaktoru¹⁴. Skutečnost, že odtoková koncentrace N-NO_3^- převyšuje ve fázi standardního provozu významným způsobem přítokovou koncentraci N-amon, je způsobena zejména odparem vody v intenzivně provzdušňovaném nitrifikačním reaktoru a s ním spojeným zahušťováním digestátu. Méně významným důvodem byla v daných podmínkách patrně mineralizace organického dusíku obsaženého v surovém fermentačním zbytku. Tyto předpoklady byly i experimentálně ověřeny, intenzita přítoku byla vždy o cca 20 – 25 % vyšší než intenzita odtoku. Organický dusík představoval v použitém vzorku digestátu méně než 5 % z celkového dusíku.

Po celou dobu provozu reaktoru nedocházelo k významnějšímu hromadění N-NO_2^- , jehož koncentrace v odtoku po celou dobu provozu systému nepřevyšovala 30 mg/l s tím, že v rámci většiny měření byly zaznamenány dokonce hodnoty pohybující se pod 2 mg/l. Zastoupení N-NO_2^- mezi konečnými produkty nitrifikace ve fázi standardního provozu nikdy nepřekročilo 2 %, přičemž průměrně činilo 0,24 %. To svědčí o vysoké aktivitě obou základních skupin nitrifikačních organismů, tedy nitrifikačních (AOB – ammonia oxidising bacteria) i nitratačních (NOB – nitrite oxidising bacteria) bakterií^{25, 26, 29}. Zároveň je toto zjištění velice pozitivní z hlediska potenciální toxicity N-NO_2^- vůči rostlinám, k jejichž výživě by byl zpracovaný digestát využit³⁰.

Odtoková koncentrace N-amon se po většinu sledovaného období pohybovala hluboko pod 100 mg/l. Výjimkou byla fáze zapracování reaktoru, ve které zpočátku dosahovala až 360 mg/l a období mezi cca 40. a 80. dnem provozu reaktoru. Za těchto podmínek dosahovala ve fázi standardního provozu reaktoru účinnost převedení N-amon na oxidované formy průměrně 95,8 %.

V každém případě je na základě výše shrnutých výsledků možno konstatovat, že nitrifikace probíhala úspěšně a jeví se jako reálné rozšířit aplikovatelnost tohoto postupu z fugátu¹⁴ na neseparovaný fermentační zbytek.

Výzvy pro navazující výzkum

Výše presentované výsledky se v mnoha ohledech jeví jako velice nadějně. Na druhou stranu, výzkum realizovaný v rámci projektu SQ01020303 je teprve ve fázi prvního roku jeho řešení, přičemž jeho dokončení se předpokládá v roce 2028. Je zřejmé, že je mimo jiné zapotřebí dále optimalizovat dílčí procesy zpracování digestátu.

K činění serióznějších závěrů v oblasti stripování amoniaku jakožto postupu zpracování digestátu bude potřeba za účelem identifikace optimálního přístupu testy simulující tento proces opakovat v mnoha variantách probíhajících za různých podmínek. Počítá se s konstrukcí nové stripovací kolony umožňující plynulou regulaci množství dodávaného vzduchu a kontinuální měření průtoku tohoto vzduchu. Kolona umožní zároveň variabilní možnosti dávkování fermentačního zbytku, které bude kontinuální, resp. diskontinuální. Průtok zpracovávaného digestátu bude možno realizovat ve směru zdola nahoru i shora dolů. Předpokládá se možnost sledování koncentrace NH_3 v plynu odcházejícím z kolony. I v rámci navazujících experimentů bude jednou z hlavních priorit minimalizovat spotřebu chemikálií a celkově vylepšovat ekonomiku procesu stripování.

Zajímavé výzvy je možno nalézt také v oblasti pokračování výzkumu zaměřeného na nitrifikaci digestátu. Dosud provedené experimenty proběhly s jeho ředěním, přičemž pro optimální řešení problému bude zapotřebí nalézt cesty k aplikaci procesu na digestát, který ředěn nebude. Za tímto účelem se mimo jiné předpokládá využití peristaltických čerpadel využívajících pro transport digestátu hadičky s podstatně větším vnitřním průměrem než aktuálně využívaná čerpadla. Touto cestou by měly být minimalizovány problémy s ucpáváním hadiček. Předpokládají se také aktivity spojené se snahou o minimalizaci nákladů na proces nitrifikace fermentačního zbytku mimo jiné v souvislosti se snahami o snížení nároků na dodávku vzduchu do nitrifikačního reaktoru za účelem snížení energetické náročnosti procesu.

V dalších fázích výzkumu se počítá s postupnou integrací stripování amoniaku a nitrifikace do dvoustupňového postupu zpracování digestátu a s ověřováním možnosti tento přístup aplikovat za účelem snížení nákladů na zpracování digestátu a celkové racionalizace procesu. Následně budou identifikovány možnosti rozšíření sledu zpracovatelských postupů o tepelné zahuštění s cílem určit optimální podmínky pro aplikaci soustavy stripování-nitrifikace-tepelné zahuštění. Účelem těchto aktivit přitom bude využít všech benefitů dílčích procesů, které byly zmíněny v úvodu tohoto příspěvku. Počítá se také s poloprovozním ověřením výsledků laboratorní fáze výzkumu.

Závěr

Digestát představuje materiál dobře využitelný ve výživě rostlin. Na druhou stranu je nakládání s ním spojeno s řadou problémů a aktuálně používaný přístup k jeho využití není ani zdaleka optimální. Výzkum v oblasti stripování amoniaku z digestátu a nitrifikace provozované v tomto materiálu naznačuje potenciál obou postupů ve smyslu jejich využití jako metod vedoucích k racionalizaci nakládání s digestátem. Zároveň je zřejmé, že oba tyto dílčí procesy je potřeba dále optimalizovat, přičemž jako zajímavá se jeví myšlenka jejich integrace do sekvence vícestupňového zpracování diskutovaného materiálu. Další benefity může přinést například jejich kombinace s tepelným zahuštěním digestátu předupraveného stripováním amoniaku a/nebo nitrifikací.

Poděkování

Výsledky tohoto příspěvku byly získány v rámci aktivit spojených s řešením projektu TAČR č. SQ01020303. Autoři tímto děkují poskytovateli dotace za finanční podporu.

Literatura

1. Straka F., Dohányos M., Zábranská J., Dědek J., Malihevský A., Novák J., Oldřich J.: *Bioplyn: Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. GAS s.r.o., Říčany 2003.
2. Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P., Fialka P., Kajan M.: *Anaerobní čistírenské technologie*. NOEL 2000, Brno 1998.
3. Al Seadi T., Drosch B., Fuchs W., Rutz D., Janssen R.: *The Biogas Handbook - Science, Production and Applications*. Chapter 12 – Biogas digestate quality and utilization. Woodhead Publishing Limited 2013.
4. Whelan M.J., Everitt T., Villa R.: A mass transfer model of ammonia volatilisation from anaerobic digestate. *Waste Manage* 30, 1808 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.012>.
5. Finzi A., Riva E., Bicoku A., Guido V., Shallari S., Provolo G.: Comparison of techniques for ammonia emission mitigation during storage of livestock manure and assessment of their effect in the management chain. *J. Agric. Eng.* 50. 12 (2019). <https://doi.org/10.4081/jae.2019.881>.
6. Pedersen J., Hafner S.D.: Ammonia emissions after field application of anaerobically digested animal slurry: Literature review and perspectives.. *Agric. Ecosyst. Environ.* 357, 108697 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108697>.
7. Sarec P., Novák V., Látal O., Dedina M., Korba J.: Digestate Application on Grassland: Effects of Application Method and Rate on GHG Emissions and Forage Performance. *Agronomy (Basel)*. 15 (5), 1243 (2025). <https://doi.org/10.3390/agronomy15051243>.
8. Efosa N., Häni C., Kupper T., Krause H.M., Six J., Bünemann E.K.: Ammonia emissions after trailing hose application of digestates and cattle slurry. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 130, (3) 419 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10705-025-10407-7>.
9. Perazzolo F., Mattachini G., Riva E., Provolo G.: Nutrient losses during winter and summer storage of separated and unseparated digested. cattle slurry. *J. Environ. Qual.* 46 (4), 879 (2017). <https://doi.org/10.2134/jeq2016.07.0274>.
10. Li Y., Liu H., Li G., Luo W., Sun Y.: Manure digestate storage under different conditions: Chemical characteristics and contaminant residuals. *Sci. Total Environ.* 639, 19 (2018). <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.128>.
11. Nicholson F., Bhogal A., Cardenas L., Chadwick D., Misselbrook T., Rollett A., Taylor M., Thorman R., Williams J.: Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environ. Pollut.* 228, 504 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.023>.
12. Nařízení vlády č. 262/2012 Sb. O stanovení zranitelných oblastí a akčním programu. In: *Sbírka zákonů*. 27. 7. 2012.
13. Směrnice Rady 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů.
14. Míchal P., Švehla P., Tlustoš P.: Zpracování kapalně frakce fermentačního zbytku biologickou nitrifikací a tepelným zahuštěním. *Waste Forum*. 10, 299 (2017).
15. Palakodeti A., Azman S., Rossi B., Dewil R., Appels L.: A critical review of ammonia recovery from anaerobic digestate of organic wastes via stripping. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 143, 110903 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110903>.
16. Abba A., Domini M., Baldi M., Collivignarelli M.C., Bertanza G.: Investigation of the Main Parameters Influencing the Kinetics of an Ammonia Stripping Plant Treating Swine Digestate. *Sustainability*. 15 (13), 10494 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151310494>.
17. Sengur O., Akgul D., Alper Bayrakdar A., Calli B.: Enhancing biogas production from chicken manure through vacuum stripping of digestate. *Biomass Convers. Biorefin.* 2023. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04975-3>.
18. Chen Q.H., Yang D.H., Chen X., Wang X. K., Dong B., Dai X.H.: Vacuum ammonia stripping from liquid digestate: Effects of pH, alkalinity, temperature, negative pressure and process optimization. *J. Environ. Sci.* 149, 638 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.010>.
19. Vaněk, V. a kol.: *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press s. r. o., Praha 2016.

20. Chiumenti A., da Borso F., Chiumenti R., Teri F., Segantin P.: Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: Tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Manage.* 33, 1339 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.023>.
21. Vondra M., Masa, V., Bobak, P.: The potential for digestate thickening in biogas plants and evaluation of possible evaporation methods. *Chem. Eng. Trans.* 52, 787 (2016).
<https://doi.org/10.3303/CET1652132>.
22. Khan O., Mufazzal S., Khan Z.A., Sherwani A.F., Yahya Z., Alhodaib A.: Optimizing the performance parameters of vacuum evaporation technology for management of anaerobic digestate in a waste water treatment plant using fuzzy MCDM method. *Desalin. Water. Treat.* 320, 100864 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100864>.
23. Svehla P., Vargas C. M. L., Michal P., Tlustos P.: Thermal thickening of nitrified liquid phase of digestate for production of concentrated complex fertiliser and high-quality technological water. *J. Environ. Manage.* 276, 111250 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111250>.
24. Svehla P., Vargas C.M.L., Michal P., Tlustos, P.: Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. *Environ. Technol. Inno.* 17, 100514 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100514>.
25. Chudoba J., Dohányos M., Wanner J.: *Biologické čištění odpadních vod*. SNTL, Praha 1991.
26. Svehla P., Bartacek J., Pacek L., Hrnčířová H., Radechovský J., Hanc A., Jeníček P.: Inhibition effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrite-oxidising bacteria during sludge liquor treatment: Influence of feeding strategy. *Chem. Pap.* 68, 871 (2014). <https://doi.org/10.2478/s11696-014-0538-6>.
27. Horáková M., Janda V., Koller J.: *Analytika vody*. VŠCHT, Praha 2003.
28. Provolò G, Perazzolo F, Mattachini, G, Finzi A, Naldi E., Riva, E.: *Waste Manage.* 69, 154 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.047>.
29. Anthonisen A.C., Loehr R.C., Prakasam T.B.S., Srinath E.G.: Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J. Water Poll. Contr. Fed* 48, 835 (1976).
30. Court M.N., Stephens R.C., Wais J.S.: Toxic effect of urea on plants: Nitrite toxicity arising from the use of urea as a fertiliser. *Nature* 194, 1263 (1962).

Reasonable Approaches to Digestate Handling

Pavel MÍCHAL, Pavel ŠVEHLA, Barbora KOUBKOVÁ, Jakub TEGEL, Pavel TLUSTOŠ

Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin,
Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 - Suchbát

Summary

This paper is focused on the summarization of the knowledge in the field of innovative method of the treatment of digestate produced within the operation of agricultural biogas plants. The rationalization of the utilization of nutrients contained in the digestate is emphasised, especially the prevention of nitrogen losses during the handling with the digestate. Also the possibility of the digestate volume restriction is discussed with the aim to minimize the problems related to digestate storage and transport. The main aim of presented research is to identify the ways enabling optimal utilization of digestate in plant nutrition. Up to now gained results of laboratory research in the field of ammonia stripping providing valuable nitrogen fertilizer are summarised. Similarly, also the results of laboratory simulation of the nitrification process of digestate with the aim to prevent ammonia emission are presented. The results indicate relatively high potential for the application of tested methods in full scale conditions. The plans for subsequent research are also presented where the possibility of gradual transfer of developed technologies into practise is emphasised. These activities will include e.g. the integration of the stripping with the nitrification into more-stages treatment process. Also the possibility of the combining them with the thermal thickening of digestate will be evaluated.

Keywords: biogas plants, digestate, ammonia emission, stripping, nitrification, thermal thickening