

Metodický postup pro efektivní užití digestátu ze zemědělských bioplynových stanic

Certifikovaná metodika



Renata Duffková, Gabriela Mühlbachová a kol.



VÚMOP, v.v.i., VÚRV, v.v.i.

2016

Metodický postup pro efektivní užití digestátu ze zemědělských bioplynových stanic

Certifikovaná metodika

**Renata Duffková, Gabriela Mühlbachová
a kol.**



**T A
Č R**

2016

Autoři:

Ing. Renata Duffková, Ph.D.¹ (duffkova.renata@vumop.cz)

Ing. Gabriela Mühlbachová, Ph.D.² (muhlbachova@vurv.cz)

Ing. Jan Matějka³ (jan.matejka@ecotrend.cz)

Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D.¹

Ing. Helena Kusá, Ph.D.²

Ing. Petr Fučík, Ph.D.¹

Ing. Martin Káš²

Ing. Luboš Nobilis³

Ing. Pavel Bartoš⁴

Ing. Bohuslav Fendrych⁵

Návrh obálky:

Ing. Jana Maxová¹

¹ Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. (55 %)

² Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. (30 %)

³ ECO trend Research centre s.r.o. (5 %)

⁴ ZD Krásná Hora nad Vltavou, a.s. (5 %)

⁵ Zemědělské obchodní družstvo Kámen (5 %)

Poděkování:

Metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR a jako plánovaný výstup projektu č. TA03020202 „Optimalizace použití digestátu na zemědělskou půdu ve vztahu k efektivnímu využití živin a ochraně půdy a vody“.

Metodika byla schválena pro využití v praxi Ministerstvem zemědělství ČR – osvědčením č. j. 73330/2016-MZE-17221 ze dne 20.12.2016 a bude uplatněna Českou bioplynovou asociací, z.s.

Recenzovali:

Ing. Michaela Budňáková, Ministerstvo zemědělství ČR

Mgr. Ing. Lukáš Páček, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Vydaly:

VÚMOP, v.v.i a VÚRV, v.v.i. v roce 2016 v nákladu 200 ks

Tisk:

Powerprint, s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6

© Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., 2016 (ISBN 978-80-87361-62-7)

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2016 (ISBN 978-80-7427-227-1)

Obsah

I. Cíl metodiky.....	5
II. Vlastní popis metodiky.....	5
1. Úvod – současný stav poznání dané problematiky	5
1.1. Vliv anaerobní fermentace na vlastnosti digestátu	7
1.2. Působení digestátu a složek separace na plodinné výnosy, půdu, vodu a ovzduší	8
2. Legislativa při nakládání s digestátem	17
2.1. Legislativní prostředí v rámci EU	17
2.2. Legislativní prostředí v rámci ČR.....	18
3. Materiál a metody	21
3.1. Maloparcelkový pokus Lukavec.....	21
3.2. Polní provozní pokusy	24
4. Postupy efektivního nakládání s digestátem při pěstování kukuřice.....	29
4.1. Postupy pro optimální výnosy	29
4.2. Postupy pro minimalizaci vyplavení dusičnanů do vod.....	39
5. Vliv digestátu na půdní vlastnosti a vyplavení dusičnanů do drenážních vod	47
5.1. Obsahy přístupných makroprvků a mikroprvků	47
5.2. Půdní struktura	55
5.3. Půdní organická hmota.....	56
5.4. Koncentrace a odnosy dusičnanového N v drenážních vodách.....	58
6. Doporučení pro praxi - závěr.....	64
7. Summary.....	67
III. Srovnání novosti postupů	68
IV. Popis uplatnění certifikované metodiky	70
V. Ekonomické aspekty	71
VI. Seznam použité související literatury	73
VII. Seznam předcházejících publikací autorů.....	80
Seznam použitých zkratk.....	81
Certifikační doložka	82

I. Cíl metodiky

Prioritním cílem metodiky je předložení ověřených agrotechnických postupů efektivního nakládání s digestátem a jeho složkami separace (separátem a fugátem) ze zemědělských bioplynových stanic (BPS). Tyto postupy slouží k optimálnímu využití aplikovaných živin pro zajištění přijatelných výnosů plodin a omezení ztrát živin vyplavením do vod. Metodika je zaměřena na použití digestátu a jeho složek separace zejména při pěstování kukuřice.

V metodice jsou uvedeny i nové poznatky o vlivu aplikace digestátu na půdní vlastnosti (obsah přístupných živin, půdní strukturu, obsah půdní organické hmoty) a kvalitu drenážních vod (obsah dusičnanového dusíku).

II. Vlastní popis metodiky

Metodické postupy uvedené v této metodice byly vytvořeny v rámci řešení výzkumného projektu TA03020202 „Optimalizace použití digestátu na zemědělskou půdu ve vztahu k efektivnímu využití živin a ochraně půdy a vody“. Metodika obsahuje v první úvodní části přehled současného stavu poznání dané problematiky, který vychází z literární rešerše vědeckých publikací domácího a i zahraničního původu. Ve druhé části je uveden přehled legislativy, která má souvislost s digestátem a jeho aplikací. Dále navazují kapitoly, které uvádějí vlastní efektivní postupy a kvantifikují působení digestátu a fugátu na půdní vlastnosti a kvalitu drenážních vod.

1. Úvod – současný stav poznání dané problematiky

Motto: Dobře aplikovaný digestát nemá negativní účinky na půdní vlastnosti ani plodiny

Vlastní metodice předchází souhrn nejnovějších (zejména zahraničních) poznatků o vlastnostech digestátu, které zahrnují jeho hnojivé účinky, vliv na výnosy plodin, půdní vlastnosti a emise do ovzduší a vody.

Digestát je tekutý/polotekutý zbytek po výrobě bioplynu vzniklý anaerobní fermentací (AF) organické hmoty v bioplynových stanicích (BPS). Digestát ze zemědělských BPS je typové organické hnojivo, které vzniklo výhradně ze statkových hnojiv a objemných krmiv a jehož užití na zemědělskou půdu nepodléhá v rámci zemědělského podniku ohlášení ani registraci. Výroba bioplynu (směs metanu CH_4 , oxidu uhličitého CO_2 , vody, sirovodíku a amoniaku NH_3) pomocí AF je považována za jednu z energeticky nejúčinnějších technologií výroby bioenergie, která je zároveň příznivá z hlediska životního prostředí (Fehrenbach et al. 2008 in Weiland 2010, Goméz-Brandón et al. 2016). Ve srovnání s výrobou energie z fosilních paliv dochází při výrobě bioplynu z obnovitelných zdrojů energie k významné redukci emisí skleníkových plynů (Battini et al. 2014). Digestát obsahuje živiny snadno využitelné rostlinami, je tedy v zemědělské výrobě považován za kvalitní organické hnojivo a rovněž za vhodnou a zejména levnější alternativu k minerálním hnojivům (Herrmann 2013, Svoboda et al. 2013, Lijó et al. 2015). Běžnou technologií zvyšující výtěžnost bioplynu je tzv. kofermentace (tj. AF více druhů surovin, např. kejdy, hnoje, kukuřičné siláže, travní senáže, Mata-Alvarez et al. 2014, Lijó et al. 2015) a ke stabilizaci digestátu přispívá dodržování doby zdržení vstupních surovin ve fermentoru (Nkoa 2014). Požadavky BPS na vstupní suroviny však mění osevní postupy, výměru pěstovaných plodin a pěstební systémy zemědělských podniků v důsledku nutnosti zvýšit produkci kukuřice na siláž, která zvyšuje produktivitu bioplynu a tvoří zásadní podíl vstupních surovin AF (Möller et al. 2011). Rozšiřování ploch kukuřice pro energetické účely je z hlediska vlivu na životní prostředí považováno za negativní fenomén provozu BPS, neboť při jejím pěstování se zvyšuje riziko vodní eroze půdy, vyplavení živin do vod a snižuje se půdní kvalita a úrodnost. Rizika spjatá s konvenčním pěstováním kukuřice lze omezit užitím ochranných osevních postupů s cílem maximalizovat pokrytí půdy vegetačním pokryvem (meziplodiny, krycí plodiny, ozimé předplodiny, vč. např. pícních trav, Svoboda et al. 2015) nebo dle možností zvýšit podíl biomasy z travních porostů (Riva et al. 2016).

Česká republika k 1. 1. 2016 s celkových počtem 554 BPS (z toho 382 zemědělských) se řadí na 6. místo v Evropě (1. místo: Německo 10 786 BPS). Vzhledem k tomu, že v ČR je ročně odhadem vyprodukováno 5 mil. t digestátu, je žádoucí, aby BPS zajišťovaly kromě efektivní výroby bioplynu rovněž produkci stabilizovaného digestátu s minimálním nežádoucím dopadem na zemědělskou výrobu. Digestát lze separovat na fugát (kapalná složka separace) a separát (tuhá složka separace), a to v poměru cca 4-5:1, tj. 80-84 % fugátu a 16-20 % separátu. Obě složky mají rozdílné účinky na půdu a plodiny. Aplikací fugátu lze dosáhnout výnosů srovnatelných s užitím minerálních hnojiv (Nkoa 2014), separát dodává půdě organické látky (obdobu hnoje) a ve srovnání s digestátem dodává půdě dvakrát více fosforu a hořčíku. Také se využívá jako podestýlka, pro výrobu kompostu nebo substrátů (Walsh et al. 2012, Möller a Müller 2012). Pro dosažení uspokojivých výnosů je při užití separátu jako hnojiva na podzim předpokládána doplňková aplikace minerálních hnojiv na jaře, která podpoří mineralizaci organické hmoty a zpřístupní potřebné živiny (Chiyoka et al. 2014).

1.1. Vliv anaerobní fermentace na vlastnosti digestátu

V důsledku užití objemných krmiv pro výrobu bioplynu se po zprovoznění BPS do půdy dostane více organických hnojiv, než tomu bylo dříve. Během výroby bioplynu dochází v závislosti na složení vstupních surovin k transformaci a stabilizaci organické hmoty a obsah organického uhlíku (C) klesne o 20–95 %. To se projeví i na snížené hmotnosti digestátu ve srovnání s původními surovinami (v průměru o 20 – 40 %). Rovněž klesá viskozita a poměr uhlíku a dusíku C:N (5,9), naopak vzrůstá obsah minerálního dusíku (N), zejména v amonné formě N-NH_4 (v průměru 58-64 % z celkového N) a pH (7,9) (Möller 2015). Obsah organické hmoty v digestátu a jeho složkách separace se pohybuje v rozmezí 38–75 % a C:N v rozmezí 6,2–24,8 (Nkoa 2014).

1.2. Působení digestátu a složek separace na plodinové výnosy, půdu, vodu a ovzduší

Živiny v půdě po aplikaci digestátu jsou využity na tvorbu výnosu plodin, ovlivňují půdní úrodnost, strukturu a obsah půdní organické hmoty. Na druhou stranu tyto živiny mohou podléhat vyplavování do povrchových i podzemních vod a unikají v podobě plyných emisí do ovzduší (NH_3 , oxid dusný N_2O , CO_2 , CH_4 , Nkoa 2014, Monlau 2016).

a) Vliv digestátu a složek separace na plodinové výnosy

Digestát je organické hnojivo, které krátkodobě zvyšuje obsah přístupných živin (zejména N-NH_4) pro přijatelné výnosy plodin (Nkoa 2014, Weiland 2010). Např. Riva et al. (2016) uvádějí shodné výnosy kukuřice na siláž po injektážní aplikaci fugátu a povrchové aplikaci močoviny. Šimon et al. (2015) zjistili dokonce vyšší výnosy ozimé pšenice po aplikaci digestátu ve srovnání s minerálním NPK hnojivem, a to při odlišných dávkách celkového N (digestát = 76 kg N/ha, NPK = 120 kg N/ha). Walsh et al. (2012) uvádějí také vyšší výnosy travních porostů po aplikaci fugátu než po aplikaci ledku amonného, neboť fugát obsahuje i další živiny (P, K) a výnos po jeho aplikaci byl srovnatelný s minerálním NPK. Separát obsahuje nižší podíl minerálního N (24–36 % celkového N) než fugát, neboť vysoký C:N (>16-20), snížený obsah N-NH_4 a dobrá degradabilita C a N podporuje u tohoto hnojiva imobilizaci (Nkoa 2014, Chiyoka 2014). Po aplikaci separátu byla zjištěna zvýšená koncentrace živin (ale i těžkých kovů) v půdní organické hmotě, zejména se jednalo o obohacení půdy fosforem P (Möller a Müller 2012). Aplikace digestátu a zejména separátu snižuje objemovou hmotnost, zvyšuje nasycenou hydraulickou vodivost, vodní retenční kapacitu půd, agregátovou stabilitu a početnost a biomasu žížal ve srovnání s neošetřenou kontrolou (Erhart et al. 2014, Garg et al. 2005, in Nkoa 2014). Jeho potenciál zvýšit obsah organické hmoty (humusu) je vyšší než potenciál hnojivý. Separát je

považován za vhodnou náhradu kompostu, rašeliny a hnoje (Monlau et al. 2016).

Předpokladem efektivního využití živin (zejména N) obsažených v digestátu a jeho složkách separace je zapravení ihned po aplikaci, které významně sníží volatilizaci (únik do ovzduší) NH_3 .

b) Vliv digestátu na půdní vlastnosti a půdní biologickou aktivitu

Vliv aplikace digestátu na akumulaci živin v půdě je závislý na půdním typu, klimatických podmínkách, složení vstupních surovin a dávkování. Digestát je dobrým zdrojem rychle dostupných makroživin (N, P, K) i stopových prvků (Alburquerque et al. 2012), zlepšuje půdní úrodnost a může z velké části nahradit minerální hnojiva. Zároveň je i zdrojem sodíku (Na) a těžkých kovů (Cd, Ni, Zn, Ni, Mn, Cu), jejichž obsahy však byly podlimitní (Pabón et al. 2014) nebo byly limity přesaženy spíše výjimečně (Zn, Ni, Cu, Bonetta et al. 2014). Aplikace digestátu a zejména fugátu zvyšuje dostupnost N pro rostliny, neboť z celkového množství N je 60–80 % v minerální formě (zejména N-NH_4 , Loria et al. 2007). Börjesson a Berglund (2007) předpokládají, že veškerý obsah P v digestátu je pro rostliny dostupný. Makádi et al. (2016) uvádějí, že digestát je pro rostliny lepším zdrojem P a K než N, avšak v závislosti na složení vstupních surovin.

Správná aplikace digestátu respektující dávkování podle potřeb plodin nemá negativní vliv na půdní chemické vlastnosti.

Aplikace digestátu má kladný vliv na půdní strukturu, tj. na tmelení půdních agregátů. Zejména separát s vyšším obsahem organické hmoty (15 %, cca 5x více než fugát) podporuje významně stabilitu půdní struktury. Sloučeniny odolné rozkladu během AF (celulóza, lignin, humusové látky) reagují přímo s půdním povrchem a tím zvyšují půdní agregaci. Zlepšení stability půdní struktury přináší zvýšení infiltrace vody do půdy, pórovitosti, přívod kyslíku, retenční vodní kapacity a snížení náchylnosti půdy k vodní erozi (Gómez-Brandón et al. 2016).

Půdní mikrobiální aktivita a diverzita a obsah organické hmoty po aplikaci digestátu se zvyšuje ve srovnání s minerálními hnojivy nebo nehnojenou kontrolou (Alburquerque et al. 2012, Bachman et al. 2014, Makádi et al. 2016). Ve srovnání s kejdou je však aktivita mikrobů nižší (respirace, metabolický kvocient, mineralizace N). Gómez-Brandón et al. (2016) však uvádějí po aplikaci digestátu a kompostu vyšší nitrifikaci ve srovnání s hnojem nebo kejdou skotu či nehnojenou kontrolou (0-60 dnů po aplikaci), ale naopak nižší obsah mikrobiální biomasy a intenzitu respirace (0-15 dnů po aplikaci). Šimon et al. (2015) zjistili nejvyšší obsah mikrobiální biomasy v případě, že digestát byl aplikován společně se slámou, která je zdrojem dostupného C pro mikrobiální aktivitu (v průměru tři let o 43 % více ve srovnání s nehnojenou kontrolou). Na druhou stranu aplikace digestátu se slámou snižuje mineralizaci organické hmoty a dostupnost přístupných živin pro plodiny (nižší výnosy). Insam et al. (2015) se však domnívají, že aplikace digestátu zvyšuje mikrobiální aktivitu i biomasu nejen ve srovnání s minerálními hnojivy, ale i kejdou. Ve vegetační sezóně však většinou žádné rozdíly mezi digestátem a statkovými hnojivy shledány nebyly (Walsh et al. 2012, Bachman et al. 2014). Digestát s vyšší biodegradabilitou (z jetelotrav) má vyšší krátkodobý efekt na mikrobiální aktivitu ve srovnání s digestátem z kukuřice.

Z dlouhodobého hlediska (měsíce až roky) se nejeví, že by digestát ve srovnání s organickými hnojivy měl na půdní biologickou aktivitu rozdílný vliv. Schauss (2006) uvádí, že denitrifikace a nitrifikace byly shodné po 4 letech sledování po aplikaci digestátu i statkového hnojiva. Rovněž respirace, obsah mikrobiálního C, obsah vodou extrahovatelného C a celkový obsah C byly obdobné, a to navzdory velkým rozdílům v celkovém obsahu C u surovin vstupujících do fermentoru.

Aplikace digestátu mění půdní mikrobiální společenstvo z dlouhodobého hlediska tím, že vzrůstá množství pomalu rostoucích mikroorganismů na úkor rychle rostoucích. Tento posun je také vztažen ke změně zastoupení hub a bakterií. Anaerobní fermentace snižuje riziko výskytu patogenů v půdě ve

srovnání s kejdou. V digestátu se nevyskytují fekální koliformní bakterie, přesto, zejména při mezofilní fermentaci (35-42 °C), v digestátu přetrvávají patogeny rodů *Clostridium* (*C. perfringens*) a *Bacillus* (Gómez-Brandón et al. 2016).

c) Vliv digestátu na půdní organickou hmotu

Aplikací digestátu se do půdy dostává sice dostatek organických látek (fugát a digestát 3-6 %, separát až 19 %), tj. stejné množství jako s kejdou či hnojem, ale většina těchto látek je stabilizovaná (s vyšším stupněm aromaticity) a hůře rozložitelná (mineralizovatelná) neposkytující mikroorganismům dostatek lehce dostupného C jako zdroj energie. Většina lehce dostupného (hydrolyzovatelného) organického C je rozložena již během procesu AF (Tambone et al. 2009, 2013, Marcato et al. 2009). Těkavé mastné kyseliny jsou během AF rozloženy z více než 90 %, hemicelulóza z více než 80 %, celulóza z více než 50 %, kdežto lignin není rozložen vůbec. Tyto alifatické a aromatické molekuly představují po aplikaci do půdy potenciál prekursorů humusu. Celkový obsah C v suché hmotě digestátu je 28-47 % (Möller a Schultheiss 2014).

Organická hmota digestátu je v půdě sice dále mineralizována, ale v daleko menším rozsahu než po aplikaci kejdy či hnoje (cca 2,5-3 x méně než hnůj a kejda skotu). Se zpomalenou mineralizací organického C v digestátu se rovněž snižuje i aktivita mikroorganismů (např. amonifikačních a denitrifikačních bakterií) a zároveň by mohlo docházet ke snižování obsahu půdní organické hmoty čerpáním lehce dostupného C z půdy. Senbayram et al. (2009, in Insam et al. 2015) uvádějí po aplikaci digestátu zvýšení mineralizace C půdní organické hmoty (priming effect). Rovněž Gómez-Brandón et al. (2016) uvádějí cca 2,5-3 x nižší obsah organického C v půdě v období 0-60 dní po aplikaci digestátu ve srovnání s aplikací kompostu, hnoje a dokonce i ve srovnání s nehnojenou půdou. Šimon et al. (2015) však naopak zmiňují, že aplikace digestátu k ozimé pšenici zvýšila obsah organického C o

2 % ve srovnání s nehnojenou kontrolou. Digestát se slámou zvýšil významně obsah dostupného C v půdě (o 8 %). Möller (2009) neshledal žádné rozdíly v obsahu půdního organického C a celkového N po čtyřech letech polního pokusu s kejdou a digestátem z kejdy. I Fouda (2011) zjistil stejnou akumulaci organického C v půdě po aplikaci kejdy i digestátu, ačkoliv obsah organického C v kejdě byl téměř dvakrát vyšší než v kejdě po AF. Thomsen et al. (2013) potvrdili, že z dlouhodobé perspektivy je retence půdního C pocházejícího z rostlin málo ovlivněná faktem, zda tento C prošel trávicím traktem skotu nebo AF. Ztráty C během AF jsou tedy kompenzovány nižší degradací C v půdě po aplikaci digestátu ve srovnání s kejdou. Vliv AF na půdní organickou hmotu i z dlouhodobého hlediska je pravděpodobně zanedbatelný. Dynamika půdní organické hmoty po aplikaci digestátu na půdu nebyla ovlivněna ani složením vstupních surovin, neboť půdní akumulace C po aplikaci digestátu s vysokým obsahem C (z jetelotravy) byla stejná jako po aplikaci digestátu z kukuřice (Fouda 2011).

Akumulace C v půdě může být významně ovlivněna změnami v osevních postupech a výměrách plodin, tj. pěstováním nových energetických plodin, změněnými termíny sklizně, využitím meziplovin a posklizňových zbytků jako vstupních surovin do fermentoru.

d) Vliv aplikace digestátu na vyplavování živin do vody

Po aplikaci digestátu/fugátu existuje zvýšené riziko vyplavení dusičnanového N (N-NO_3) a P do vod, které vyplývá z vysokého podílu přístupných živin tohoto hnojiva (zejména N-NH_4), resp. z mineralizace organické hmoty v době nízkého čerpání živin porostem. Vyplavování N-NO_3 je vázáno zejména na provzdušňovanou, lehkou (písečitou, hlinitopísečitou), kamenitou a odvodněnou ornou půdu, kde je urychlována mineralizace organického N, resp. nitrifikace amonného iontu a snižuje se denitrifikační činnost (tj. emise N_2O , N_2 a CO_2). O dynamice vyplavení N rozhodují zejména povětrnostní vlivy, uvolňování minerálního N z organické hmoty, příjem živin plodinou v průběhu vegetační

sezóny a chemické složení digestátu. Svoboda et al. (2015) zjistili nižší vyplavení N z půdy se silážní kukuřicí po aplikaci digestátu ve srovnání s minerálními hnojivy a dokonce i mírně nižší ve srovnání s kejdou prasat. Chantigny et al. (2008) a Möller a Stinner (2009) však uvádějí, že aplikace digestátu ve srovnání s ostatními organickými hnojivy nesnižuje obsah reziduálního N-NO₃ na podzim, tudíž nemá vliv na snížení vyplavení N-NO₃ v období nejvyšších ztrát N-NO₃. Celkové vyplavení N je ovlivněno zejména celkovou změnou, která nastala v podniku po zavedení BPS (Erhart et al. 2014). Jedná se např. o zvýšení skladovacích kapacit pro tekutá organická hnojiva a využití zeleného hnojení, posklizňových zbytků pro energetické účely (pozitivní dopad) nebo zvýšené pěstování kukuřice na siláž se zvýšenými riziky vyplavení N, půdní eroze a degradace půdní organické hmoty (negativní dopad). Ochranný osevní postup pěstování kukuřice se zařazením obilnin a pícní trávy (pšenice ozimá sklizená na zeleno a jílek mnohokvětý) snížil vyplavení N-NO₃ ve srovnání s konvenčním pěstováním kukuřice (Svoboda et al. 2015). Vyplavení N-NO₃ po aplikaci digestátu (200 kg N/ha/rok) s ochranným osevním postupem bylo nižší i po přepočtu na jednotku produkce metanu (3 kg N-NO₃/megalitr CH₄) ve srovnání s konvenčním pěstováním (4,5 kg N-NO₃/megalitr CH₄).

Vliv aplikace digestátu a jeho složek na vyplavení P není úplně jednoznačný, neboť na jedné straně je jeho mobilita zvýšena vytěsněním organickou hmotou a vysokou mobilitou organického rozpuštěného P, na druhé straně během procesu AF dochází ke snížení přístupnosti P (tvorba nerozpustných Ca a Mg fosfátů či struvitu). Osvědčené postupy hospodaření pro zmírnění ztrát P zahrnují hnojení na základě bilance P, bezorebnou technologii nebo minimální zpracování půdy, vápnění, maximalizaci období s vegetačním pokryvem a zavádění remediačních opatření (ochranné, tzv. buffer zóny, břehové zóny, sedimentační nádrže a mokřady) v oblastech hydrologicky navazujících na kritické zdrojové lokality.

e) Vliv aplikace digestátu na emise plynů

Po aplikaci digestátu a jeho separovaných složek mohou nastat vysoké ztráty NH_3 volatilizací (až 40 % aplikovaného N-NH_4 , Wolf et al. 2014), neboť vysoké pH a obsah N-NH_4 v digestátu volatilizaci NH_3 podporuje (7-24 % aplikovaného N-NH_4 ve srovnání s 3-8 % z kejdy, Möller a Müller 2012, Gericke et al. 2012). Naopak nižší obsah suché hmoty a nižší viskozita digestátu podporují infiltraci do půdy a snížení volatilizace (Sommer a Hutchings, 2001). Tudiž jsou uváděny vyšší, stejné i nižší ztráty NH_3 ve srovnání s kejdou. Gericke et al. (2012) zjistili, že zvýšení pH o 0,1 nebo teploty o 1 °C zvýšilo volatilizaci o 1,6 %, resp. 1,0 % z celkového aplikovaného N-NH_4 . Volatilizace má negativní dopad na eutrofizaci vod, kyselou depozici a také na tvorbu sekundárních částic, u kterých byly prokázána vazba na rakovinu plic (Riva et al. 2016). Proto je nutné okamžité zapravení aplikovaného hnojiva (Insam et al. 2015). Severin et al. (2015a) uvádějí, že injekcí tekutého organického hnojiva do hloubky 20-25 cm může snížit emise NH_3 až o 90 %. Riva et al. (2016) zjistili snížení emisí NH_3 o 69-77 % po injekci digestátu ve srovnání s povrchovou aplikací, a to na úroveň emisí po povrchové aplikaci močoviny (5-14 % z celkového obsahu N-NH_4). Lijó et al. (2015) uvádějí snížení volatilizace o 50 % u injektovaného digestátu ve srovnání s povrchovou aplikací digestátu.

Po aplikaci digestátu dochází k emisím skleníkových plynů (NO_x , N_2 , CO_2) v důsledku denitrifikace. Nejvíce je emitován N_2O se silně negativním dopadem na globální oteplování (až 73 % během zimního období v souvislosti se střídáním období mrazů a tání). Denitrifikaci lze redukovat použitím inhibitoru nitrifikace pro stabilizaci N, který může snížit N_2O emise až o 45-92 % a lze ho aplikovat a společně zapravit s digestátem (Severin et al. 2015a). Denitrifikace je podporována dostatečným obsahem N-NH_4 a organické hmoty v půdě s následnou vazbou na zvýšení mineralizace organické hmoty a další přísun N-NH_4 iontů pro nitrifikaci a denitrifikaci. Vzhledem k tomu, že snadno dostupné složky organické hmoty jsou během AF z velké části rozloženy,

činnost denitrifikačních bakterií po aplikaci digestátu může být limitována dostupným organickým C, sníženou anoxií a viskozitou degradované organické hmoty (Möller a Stinner 2009). Digestát s vyšší degradabilitou organické hmoty (jetelotravní směs) podmíní vyšší denitrifikaci než digestát s nižší degradabilitou (kukuřičná siláž). Na emise mají také vliv půdní podmínky (suchá, resp. písčité půda – snížení emisí N_2O , půda s vyšším obsahem organické hmoty, vlhké půdy s anoxickými mikromísty - zvýšení emisí N_2O , Eickenscheidt et al. 2014) a způsob zapravení digestátu, kdy injektážní aplikace do hloubky 15-20 cm sice omezí volatilizaci NH_3 , ale silně zvýší emise N_2O (zvýšená anoxie) ve srovnání s hadicovou aplikací a okamžitým zapravením (Severin et al. 2015b).

Po aplikaci digestátu byly emise N_2O většinou nižší než po aplikaci kejdy či hnoje. Nejvyšší ztráty N_2O byly zaznamenány 20-40 dnů po aplikaci (Chantigny et al. 2010). Vzhledem k tomu, že pěstování kukuřice je spojeno s vyššími emisemi N_2O než pěstování obilí a řepky, má AF z tohoto hlediska negativní vliv na emise N_2O . Na druhou stranu využití meziplodin, posklizňových zbytků a jetelotravních směsí emise N_2O snižuje, neboť „uzavírá“ na podzim a v zimě, tj. v období, kdy emise N_2O mohou dosáhnout až 50 % celoročních ztrát, velké množství biomasy do fermentoru. (Nadeem et al. 2012). I když na jaře je pak digestát zpět aplikován do půdy, tak přesto jsou celkové ztráty N_2O nižší. Zemědělci rovněž využívají nevymrzající meziplodiny jako vstupní surovinu do BPS. Díky nižšímu obsahu $N-NO_3$ v půdě při pěstování meziplodin se snižují i emise N_2O (Miller et al. 2009). Z hlediska emisí plynů je větším problémem po aplikaci digestátu volatilizace NH_3 než emise N_2O .

Emise plynů po aplikaci digestátu je spojena i se zápachem, který je však po aplikaci digestátu menší ve srovnání s kejdou. Fugát je zdrojem silnějšího zápachu než neseparovaný digestát (vyšší obsah amonných iontů, Riva et al. 2016).

Vysoký obsah N-NH_4 , pH a nízký obsah dostupného organického C způsobily ztrátu volatilizací NH_3 až 30 % z celkového obsahu N během uskladnění digestátu v otevřených jímkách (Möller 2015). Ztráty volatilizací u fugátu jsou přibližně stejné jako u digestátu; u separátu byly zjištěny ztráty N-NH_4 a celkového N ve výši 30–90% a 10-55% z počátečního množství N-NH_4 , resp. celkového N (Petersen a Sørensen 2008). Ztráty N_2O u separátu dosáhly až 4,8% počátečního množství N (Hansen et al. 2006). Uložení digestátu v otevřených jímkách významně zvyšuje emise skleníkových plynů (CO_2 +22,0 %, N_2O +463 %) a naopak snižuje emise CH_4 (-98,9 %) ve srovnání s ostatními statkovými hnojivy. Celkové emise skleníkových plynů během uskladnění jsou přibližně stejné (1,05 g $\text{CO}_2\text{-eq/l/den}$ u digestátu vs. 1,12 g $\text{CO}_2\text{-eq/l/den}$ u statkových hnojiv, Wang et al. 2014).

Plynné emise z fugátu a digestátu lze snížit o cca 80 % zakrytím ochrannou plynotěsnou vrstvou (Lijó et al. 2015). Omezení plynných ztrát u separátu je problém, který je řešitelný překrytím hromad separátu, jejich kompakcí a co nejrychlejší aplikací na půdu (Petersen a Sørensen 2008). Další efektivnější přístupy spočívají v technických opatřeních (sušení v kontrolovaných podmínkách s následným zachycením N, odstranění NH_3 před a po separaci). Hnojivá hodnota digestátu během nevhodného uskladnění může tudíž být výrazně snížena, což vede k nákupu vyššího množství minerálních hnojiv, resp. snížení výnosů plodin.

Pokud je uvažován vliv výrobního procesu minerálních hnojiv vs. digestátu na emise skleníkových plynů, tak digestát je velmi vhodnou alternativou z hlediska životního prostředí, neboť při produkci digestátu na rozdíl od minerálních hnojiv skleníkové plyny nevznikají. Transport kejdy do fermentoru zamezuje úniku plynů (zejména NH_3), ke kterému by došlo během jejího skladování.

2. Legislativa při nakládání s digestátem

2.1. Legislativní prostředí v rámci EU

Na evropské úrovni není v současné době použití digestátu ani jiných organických hnojiv na zemědělské půdě regulováno v rámci Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 2003/2003 ze dne 13. října 2003 o hnojivech, které udává pravidla týkající se uvádění hnojiv na trh, tedy podmínky, které je nutné dodržet, aby bylo možné používat název hnojivo ES, ale i pravidla pro jejich označení a obal. Použití digestátu (a jiných organických hnojiv) na zemědělské půdě v současnosti omezuje především Směrnice Rady 91/676/EHS (tzv. **Nitrátová směrnice**) vytvořená s cílem ochrany vod před znečištěním dusičnany ze zemědělství a často podrobné vnitřní předpisy členských států, které jsou však nejednotné. Volný pohyb organických hnojiv na evropském trhu je tedy silně znevýhodněn v porovnání s anorganickými hnojivy, které jsou většinou vyráběny v souladu s modelem lineárního hospodářství.

V březnu 2016 vydala Evropská komise v rámci balíčku oběhového hospodářství Návrh Nařízení Evropského parlamentu a Rady, kterým se stanoví pravidla pro dodávání hnojivých výrobků s označením CE na trh a kterým se mění nařízení (ES) č. 1069/2009 a (ES) č. 1107/2009. Předložené nařízení definuje společná pravidla pro přeměňování biologického odpadu na suroviny, jež mohou dále sloužit k výrobě hnojiv. Stanovuje požadavky na bezpečnost, jakost a označování, které budou muset všechny výrobky určené ke hnojení splňovat, aby se s nimi dalo volně obchodovat po celé EU. Aby mohli výrobci své produkty opatřit označením CE, budou muset prokázat, že jejich výrobky vyhovují stanoveným požadavkům a že jsou dodržena omezení k obsahu organických znečišťujících látek, mikrobiálních kontaminantů a fyzických nečistot. Komise navrhuje harmonizaci nepovinnou, aby se mohli výrobci sami rozhodnout, zda budou se svými výrobky obchodovat na základě

národních norem či je opatřovat označením CE, v souladu se zásadou subsidiarity.

2.2. Legislativní prostředí v rámci ČR

Nakládání s digestátem musí obecně respektovat shodu mezi zemědělským hospodařením a ochranou životního prostředí, která je vázána na dodržování vybraných legislativních předpisů při poskytování přímých plateb a některých podpor Programu rozvoje venkova (PRV). Jedná se o tzv. kontrolu podmíněnosti (Cross compliance), která má dvě části: 1) dodržování Standardů Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy (DZES 1 - 7) a 2) dodržování povinných požadavků na hospodaření (PPH, vybrané požadavky z 13 nařízení a směrnic EU). Zásady aplikace digestátu musí respektovat DZES 1, 3, 4 a 5 a PPH 1.

Podle **DZES 1** je nutné (v ZOD i mimo ně) dodržovat zákaz aplikace hnojiv v ochranném pásu o šířce nejméně 3 m od břehové čáry a u dílu půdního bloku s průměrnou sklonitostí převyšující 7° v ochranném pásu o šířce nejméně 25 m od břehové čáry zákaz aplikace hnojiv s rychle uvolnitelným dusíkem (v souladu s § 12 n.v. č. 262/2012 Sb. a § 39 závadné látky Vodního zákona).

Podle **DZES 3** je při zacházení se závadnými látkami nutné dodržovat pravidla, vedoucí k ochraně povrchových a podzemních vod a životního prostředí. To znamená, že při manipulaci se závadnými látkami je nutné zajistit ochranu povrchových a podzemních vod, blízkého okolí a životního prostředí a závadné látky skladovat tak, aby nedošlo k jejich úniku, popřípadě k jejich nežádoucímu smísení s odpadními nebo srážkovými vodami, a zároveň zajistit, aby technický stav skladovacích zařízení závadných látek splňoval kvalitativní požadavky vodního zákona.

Zapravení fugátu a digestátu do půdy podle **DZES 4** (minimální pokryv půdy) musí nastat 24 hodin po aplikaci (s výjimkou řádkového přihnojování hadicovými aplikátory), zapravení separátu musí následovat do 48 hodin po

aplikaci. Toto opatření snižuje ztráty NH_3 volatilizací do ovzduší a tudíž zároveň umožňuje vyšší využití N pro tvorbu výnosu.

Podle **DZES 5** na ploše půdního bloku silně erozně ohroženém vodní erozí (SEO) nelze pěstovat erozně nebezpečné plodiny (kukuřice, brambory, řepa, bob setý, sója, slunečnice a čirok); porosty ostatních obilnin a řepky olejné na takto označené ploše budou zakládány s využitím půdoochranných technologií. Na blocích mírně erozně ohrožených vodní erozí (MEO) je možné erozně nebezpečné plodiny zakládat pouze s využitím půdoochranných technologií.

Podle **PPH 1** je nutné v ZOD dodržovat zásady akčního programu Nitrátové směrnice (NS, směrnice Rady 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů, implementace do Vodního zákona, § 33 Zranitelné oblasti dusičnany a nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu, novela n.v. č. 235/2016) vyhlášeného na období 2016-2020 s účinností změn od 1.8.2016. Jedná se o zákaz aplikace hnojiv v určitém období, dodržení stanovených limitů přívodu dusíku pro jednotlivé plodiny, kontrolu technického stavu a dostatečných skladovacích kapacit u skladů statkových hnojiv, omezenou aplikaci hnojiv s ohledem na půdní a klimatické podmínky, maximální limit organického hnojení 170 kg N/ha, omezenou aplikaci hnojiv a zákaz pěstování erozně nebezpečných plodin na svažitých pozemcích, omezenou aplikaci hnojiv v blízkosti vodních toků, rybníků a nádrží a zákaz aplikace hnojiv na podmáčených, zaplavených, promrzlých a sněhem pokrytých půdách. Období zákazu je rozlišováno podle klimatických regionů (klimatické regiony 0-5: hnojiva s rychle uvolnitelným N – 15.11.-15.2., hnojiva s pomalu uvolnitelným N – 15.12.-15.2., klimatické regiony 6-9: hnojiva s rychle uvolnitelným N - 5.11.-28.2., hnojiva s pomalu uvolnitelným N – 15.12.-28.2.). Omezení a zákazy se rovněž vztahují na období po sklizni hlavní plodiny a jsou diferencované podle aplikačních pásem. Limity hnojení plodin uvedené v akčním programu Nitrátové směrnice jsou rozlišeny podle tří výnosových

hladin, které jsou stejně jako aplikační pásma (AP) vymezeny podle klimatických regionů a hlavních půdních jednotek. Největší omezení je ve III. aplikačním pásmu (půdy propustné, lehké, mělké, zamokřené, se sklonem k erozi). Z hlediska Nitrátové směrnice je digestát a fugát považován za dusíkaté hnojivo s rychle uvolnitelným N ($C:N < 10$) a separát za dusíkaté hnojivo s pomalu uvolnitelným N ($C:N > 10$). Do přívodu dusíku je v roce aplikace započítán využitelný N u fugátu a digestátu ve výši 60 % a u separátu ve výši 30 % z celkové dávky.

Podle aktuálního znění vyhl. MZe č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva má digestát mít 3-13 % sušiny a minimálně 0,3 % celkového N ve vzorku. Fugát, který je tekutým podílem po separaci digestátu a svým charakterem může vykazovat působení minerálního hnojiva, má obsah sušiny do 3 % a minimální obsah celkového N 0,1 %. Separát, který je tuhým podílem po separaci digestátu, má obsah sušiny > 13 % a minimální obsah celkového N 0,5 %. Podle této vyhlášky jsou u organických hnojiv nad 13 % sušiny (tj. separát) nejvyšší povolené obsahy rizikových prvků pro Cu 150 mg.kg^{-1} sušiny a Zn 600 mg.kg^{-1} sušiny. Pro organická hnojiva do 13 % sušiny (fugát, digestát) jsou povolené limity pro Cu 250 mg.kg^{-1} sušiny a pro Zn 1200 mg.kg^{-1} sušiny. Podle aktuálního znění vyhlášky č. 377/2013 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv je maximální aplikační dávka organických a statkových hnojiv se sušinou nad 13 % $20 \text{ tun sušiny.ha}^{-1}$ v průběhu 3 let. Maximální aplikační dávka organických a statkových hnojiv se sušinou do 13 % je $10 \text{ tun sušiny.ha}^{-1}$ v průběhu 3 let. Tato vyhláška uvádí také průměrné obsahy živin v digestátu a jeho složkách separace (digestát obsah sušiny 5,8 %, obsah N 0,53 %, P_2O_5 0,16 % a K_2O 0,35 %, fugát obsah sušiny 3,9 %, obsah N 0,51 %, P_2O_5 0,14 % a K_2O 0,34 %, separát obsah sušiny 23,0 %, obsah N 0,68 %, P_2O_5 0,30 % a K_2O 0,45 %).

3. Materiál a metody

3.1. Maloparcelkový pokus Lukavec

Pro tvorbu metodiky byly získány poznatky z maloparcelkových pokusů s různými variantami hnojení silážní kukuřice se zařazením digestátu, fugátu a separátu v Lukavci u Pacova (kraj Vysočina, 610 m n. m., ZOD, BPEJ 7.29.11, se středním rizikem infiltrace, III. AP, výnosová hladina 2, kambizem oglejená, písčitohlinitá půda) v období 2013 – 2016. Na všech variantách vedených ve čtyřech opakováních na parcelkách o velikosti 3 x 10 m byly sledovány výnosy silážní kukuřice, obsah a odnosy dusíku v biomase, obsah půdního minerálního, tj. dusičnanového a amonného dusíku a obsah dusičnanového dusíku vyplaveného do půdních vod pomocí sukčních kelímků. Předplodinami byly ozimá pšenice (2012), jarní ječmen (2013, 2014), kukuřice (2014) a ozimý ječmen (2015). Po sklizni obilovin byla vždy veškerá sláma zapravena do půdy. Pozemek byl na podzim zorán (22 cm) a hnojiva byla v letech 2013-2014 zapravena pluhem (15 cm) a v letech 2015-2016 kompaktozem (12-15 cm).

Do srovnávacích (referenčních) variant byly zařazeny parcelky s aplikací (jednorázovou či dělenou) minerálních hnojiv a s nehnojenou kontrolou. Variantně byly testovány i aplikace fugátu a digestátu dělené do dvou dávek a aplikace separátu s pozdějším přihnojením minerálními hnojivy či fugátem. Druhá dávka byla nastavena blíže počátku intenzivního růstu kukuřice (do fáze 5. listu). Tyto dávky však nebyly z technických důvodů zapraveny (imitace aplikace hadicemi). Celková dávka N v jednom roce byla v letech 2013 - 2015 vždy stejná jak u minerálních, tak u organických hnojiv, tzn., nebylo zohledněno (navýšeno) množství využitelného dusíku u digestátu, fugátu a separátu. V roce 2016 byl kromě shodných dávek ještě testován i vliv zvýšených dávek N ve fugátu a digestátu, které měly stejné množství účinného dusíku jako referenční porosty hnojené minerálními hnojivy. Podle bilance mezi předpokládaným odběrem dusíku porostem kukuřice a obsahem

minerálního půdního dusíku v jednotlivých letech činila celková dávka dusíku 140 kg/ha v roce 2013, 180 kg/ha v roce 2014, 160 kg/ha v roce 2015 a 140 a 180 kg/ha v roce 2016. Celkem bylo v jednotlivých letech aplikováno na 1 hektar 35 – 45 t digestátu, fugátu či separátu. Aplikace těchto hnojiv probíhala vždy v souladu s příznivou předpovědí počasí (ne před intenzivními srážkami). Průměrné složení užívaného digestátu, fugátu a separátu je uvedeno v tabulce 1. Sumární měsíční srážky jednotlivých vegetačních období uvádí tabulka 2. Vegetační sezóny let 2013 a 2014 byly silně vlhké (156 a 139 % dlouhodobého průměru). Naopak vegetační sezóna v roce 2015 byla suchá (72 % dlouhodobého průměru) a v roce 2016 srážkově normální (85 % dlouhodobého průměru). Ve srovnání s dlouhodobým průměrem byla distribuce srážek vegetačních sezón 2013 – 2016 v rámci jednotlivých měsíců velmi nerovnoměrná.

U jednorázových dávek proběhla celá aplikace hnojiv před setím a hnojiva byla po aplikaci ihned zapravena. U dělených dávek bylo před setím aplikováno 80-100 kg N/ha a druhá část ve fázi 4.-5. listu. Celková dávka dusíku byla vždy stejná jako u jednorázové dávky N. U varianty s minerálním hnojením byla použita kombinace NPK a močoviny; pokud byla dávka dělená, bylo v druhém termínu hnojeno pouze močovinou.

V některých letech (2015, 2016) byl za účelem snížení proplavení N-NO₃, resp. zvýšení výnosu biomasy testován přídavek inhibitoru nitrifikace k jednorázovým dávkám fugátu a digestátu.

U jednotlivých pokusných variant byly po sklizni zjišťovány výnosy kukuřice. Při sklizni byly sklizeny celkem 4 řádky rostlin a z nich byl počítán výnos na parcelu, který byl následně přepočítán na ideální výnos (výsevek 80 000 ks semen). V rostlinách (v suché hmotě) byl zjištěn obsah dusíku v %, který byl přepočítán pomocí výnosu suché hmoty na odnos dusíku v kg/ha.

Využití aplikovaného N pro tvorbu výnosu (ANR) bylo zjišťováno následovně (%):

$$\frac{\text{odnos kg N/ha} - \text{odnos kg N/ha z kontroly}}{\text{aplikované množství kg N/ha}} * 100$$

Porovnání využití dusíku po aplikaci organických hnojiv vůči aplikaci minerálních hnojiv bylo vyjádřeno tzv. relativní hnojivou hodnotou (RHH):

$$\frac{ANR \text{ organická hnojivo}}{ANR \text{ minerální hnojivo}} * 100$$

Současně s rostlinami byly po sklizni odebírány vzorky půd z hloubky 0–0,3 m a 0,3–0,6 m, z kterých byl stanoven obsah minerálního N.

Množství N v mg/l vyplavené ve formě N-NO₃ bylo zjišťováno pomocí sukčních kelímků umístěných vertikálně do hloubky 40 cm, které pomocí nastaveného podtlaku (50 kPa) shromažďovaly kapilární půdní vodu odebíranou ve čtrnáctidenních intervalech na analýzu obsahu N-NO₃. Ve vegetační sezóně 2015 nebylo vyplavování dusičnanů hodnoceno vzhledem k extrémnímu suchu a nízkému počtu vzorků vody.

V roce 2015 byly z hloubky 2–5 cm odebírány půdní vzorky pro hodnocení agregátové stability pomocí průměrné velikosti půdních agregátů (MWD) různých zrnitostních frakcí (mm). Vzorky byly odebírány po 4 opakováních na ploše s kukuřicí pěstované po kukuřici na 5 variantách (nehnojená kontrola, fugát, digestát, dělená dávka separát + fugát, minerální hnojivo) a na ploše s kukuřicí pěstované po ječmeni na třech variantách (nehnojená kontrola, podzimní separát + jarní fugát, podzimní separát + jarní NPK). Na ploše po kukuřici byly fugát, digestát, separát i minerální hnojiva aplikovány už i na jaře v roce 2014 (180 kg N/ha). Separát byl na jaře v roce 2014 aplikován v dávce 38,8 t/ha a na jaře 2015 v dávce 22,5 t/ha (100 kg N/ha). Podzimní aplikace separátu v roce 2014 (po ječmeni) byla v dávce 21,7 t/ha (100 kg N/ha). Agregáty o velikosti 3–5 mm byly podrobeny třem testům (simulace silného deště, simulace středně silného deště a test mechanického rozpadu agregátů), následně bylo stanoveno zastoupení 7 zrnitostních frakcí a výpočet MWD byl proveden s různými vahami pro jednotlivé frakce.

3.2. Polní provozní pokusy

Po celou dobu trvání projektu byl digestát a fugát rovněž aplikován na vybrané půdní bloky využívané jako orná půda ZD Krásná Hora nad Vltavou a ZOD Kámen s funkčními drenážními systémy, kdy pozemek byl na jedné části hnojen fugátem (ZOD Kámen, půdní blok Vepříkov) či digestátem (ZD Krásná Hora, půdní blok Podmoky) a na druhé části minerálním hnojivem. Dělení pozemků probíhalo ve směru po spádnicí, a to buď na základě polohy a rozsahu drenážních systémů (Krásná Hora, obr. 1) nebo podle morfologických charakteristik terénu (ZD Kámen, obr. 2). Do nejnižšího umístěných drenážních šachtic, na obou drenážních skupinách, odvodňujících odlišně hnojené části pozemků, byly osazeny vzorkovače vod pro odběry vzorků během srážko-odtokových událostí a instalovány senzory na měření vodního stavu. Byl také prováděn ruční odběr vzorků vod v pravidelných intervalech (předpoklad 14 dnů) pro analýzy koncentrací N-NO₃.

Na obou půdních blocích byly pravidelně třikrát ročně odebírány půdní vzorky na stanovení obsahu přístupných živin a obsahu půdní organické hmoty. Obsah přístupných živin (P, K, Mg, Ca a některých mikroprvků) v půdách byl sledován jak metodou Mehlich 3 používanou pro agrochemické zkoušení půd, tak pomocí výluhu octanu amonného dle metody KVK-UF (Matula 2007).

Z těchto polních provozních pokusů jsou v metodice uvedeny výsledky sledování koncentrací a odnosů dusičnanového dusíku na vybraném polním pozemku ZOD Kámen (obr. 2). Zde bylo hnojení po dvou letech prostřídáno, aby se zjistilo, zda jsou výnosy plodin (2013, 2014 a 2016 silážní kukuřice, 2015 jarní ječmen) ovlivněny výhradně hnojením nebo i hydopedologickou variabilitou pozemku. Část pozemku, která byla první dva roky hnojena fugátem, byla další dva roky hnojena minerálními hnojivy a naopak.

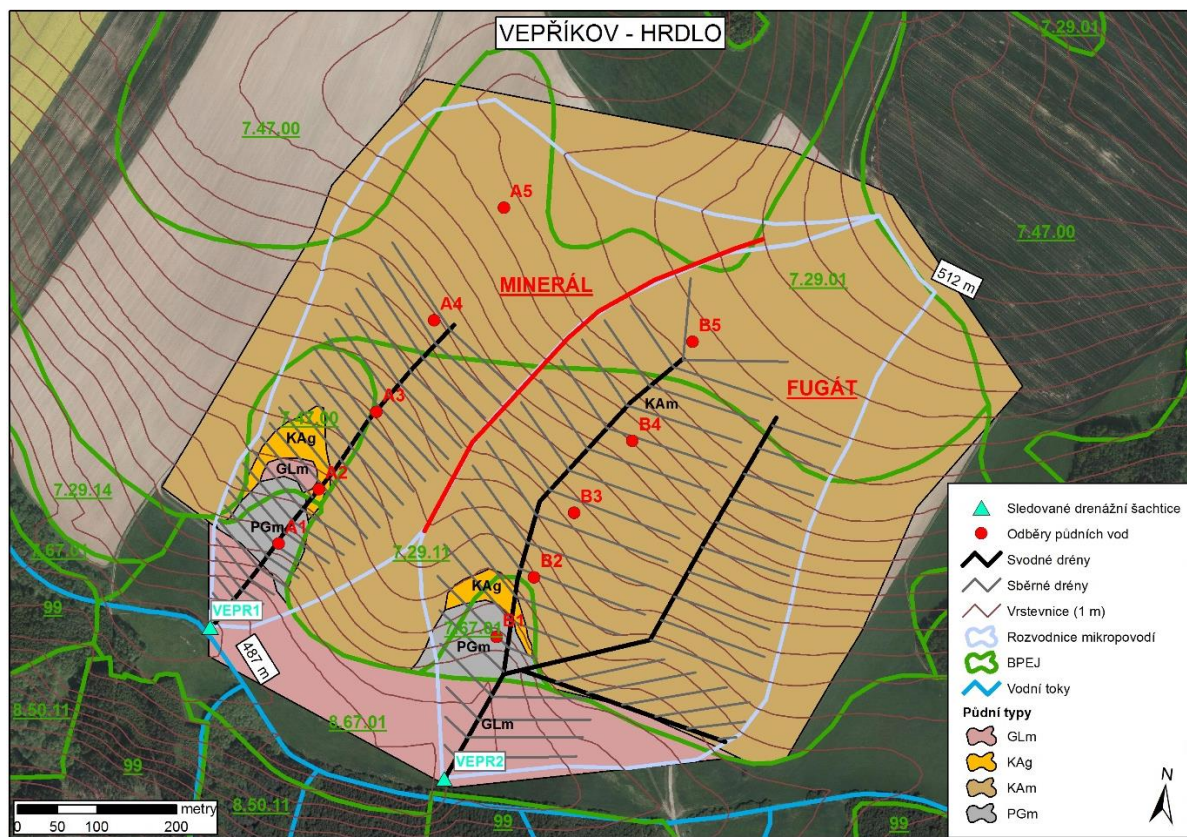
Dále jsou z obou ploch (Vepříkov, Podmoky) uvedeny poznatky ze sledování obsahu přístupných živin a obsahu půdní organické hmoty.

Tabulka 1. Rozbory digestátu, fugátu a separátu v jednotlivých letech provozování maloparcelkových pokusů, Lukavec 2013-2016

Parametry	Jednotky	2013			2014			2015			2016			Průměr [%]		
		Dig.	Fug.	Sep.	Dig.	Fug.	Sep.	Dig.	Fug.	Sep.	Dig.	Fug.	Sep.	Dig.	Fug.	Sep.
Celková sušina	%	7,48	5,14	22,30	5,22	4,84	19,85	7,13	4,83	23,90	11,31	4,71		7,78	4,88	22,02
pH	-	8,00	8,00	9,00	8,20	8,20	8,85	7,90	7,80	8,70	8,00	7,90		8,03	7,98	8,85
Dusík (N)	%	0,49	0,51	0,40	0,39	0,40	0,38	0,52	0,51	0,44	0,37	0,44		0,44	0,46	0,41
N-NH ₄	%	0,27	0,28	0,004	0,36	0,35	0,04	0,35	0,33	0,01	0,20	0,30		0,29	0,32	0,02
N-NH ₄ /N	%	54,64	55,37	1,10	90,43	85,83	10,19	67,68	64,71	3,23	53,41	69,95		66,54	68,96	4,84
Organické látky	%	5,88	3,53	18,82	3,63	3,21	15,05	5,36	3,36	19,05	7,76	3,22		5,66	3,33	17,64
C:N	-	5,95	3,49	23,31	4,61	3,99	19,84	5,17	3,26	21,42	10,53	3,70		6,57	3,61	21,52
Fosfor (P)	%	0,04	0,06	0,20	0,07	0,08	0,18	0,08	0,07	0,24	0,18	0,05		0,09	0,07	0,21
Draslík (K)	%	0,48	0,44	0,48	0,44	0,49	0,54	0,44	0,37	0,40	0,45	0,38		0,45	0,42	0,47
Vápník (Ca)	%	0,09	0,12	0,17	0,14	0,11	0,22	0,16	0,11	0,18	0,37	0,08		0,19	0,11	0,19
Hořčík (Mg)	%	0,02	0,03	0,13	0,04	0,02	0,12	0,07	0,04	0,18	0,15	0,03		0,07	0,03	0,14
Síra (S)	%	0,03	0,03	0,08	0,03	0,04	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,03		0,04	0,04	0,08

Tabulka 2. Měsíční úhrny srážek v Lukavci u Pacova během vegetačních sezón 2013-2016

Měsíc	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
Průměr (1961 – 2010)	39,8	66,1	74,7	79,8	78,2	50,0	38,0
2013	10,9	92,2	251,6	64,9	119,7	67,2	38,7
2014	56,8	148,3	69,4	72,8	77,8	115	51
2015	23,5	55,6	62,6	20,8	94,3	24,4	75,4
2016	32,0	89,3	58,4	110,5	22,8	16,4	79,7



Obrázek 2. Pokusný pozemek u Vepřikova (ZOD Kámen) s vymezením půdních typů (GLm glej modální, KAg kambizem oglejená, KAm kambizem modální, PGm pseudoglej modální), odběrných míst, sledovaných drenážních šachtic s odvodňovanými mikropovodími, BPEJ a variant hnojení (2013 – 2014, 2015 – 2016 opačně)

4. Postupy efektivního nakládání s digestátem při pěstování kukuřice

Postupy pro optimální výnosy kukuřice spojené s aplikací digestátu a jeho složek separace vycházejí z předpokladu, že distribuce srážek během vegetačního období je optimální pro příjem živin podle potřeb kukuřice, pro tvorbu výnosu a pro minimální ztráty do okolního prostředí (plynné emise, vyplavení živin do vod). Odchyłky od tohoto předpokladu více či méně snižují efektivitu postupů. Přesto však i v nepříznivých vláhových podmínkách suchého roku, kdy výrazně klesá využití živin, je možné uplatňovat postupy, které tyto negativní dopady zmírň.

4.1. Postupy pro optimální výnosy

Optimální výnosy jsou zajištěny správnou aplikací živin pro plánovaný výnos (hlavního i vedlejšího produktu) a kvalitu produkce, která vychází z výnosového potenciálu stanoviště a potřeb živin na 1 tunu sklizené produkce (Klír et al. 2016). Výnosový potenciál půdního bloku je určen na základě víceletého průměru (bez suchých let). Celkové množství aplikovaného digestátu a jeho složek separace je odvozeno z požadavků kukuřice na dusík. Ve ZOD nesmí celková dávka dusíku přesáhnout limity hnojení uvedené v akčním programu NS. Ty jsou rozděleny podle tří výnosových hladin, které jsou rozlišeny podle klimatických regionů a hlavních půdních jednotek. Celkové limity hnojení pro silážní kukuřici jsou pro výnosovou hladinu 1 (VH1) - 190, pro VH2 - 220 a pro VH3 - 240 kg N/ha. Není nutné se k těmto limitům vždy přibližovat, ale naopak je třeba při stanovení celkové potřeby N zohlednit úrodnost pozemku (tj. obsah přístupných živin a organické hmoty, pH, promyvnost atd.). V limitech hnojení pro jednotlivé VH je u kukuřice zahrnuta korekce na půdní úrodnost, tj. na dusík uvolněný mineralizací (méně úrodné VH1 mají vyšší spotřebu N na 1 tunu, VH3 naopak nižší, Klír a kol. 2016). V praxi to znamená, že pro zjištění potřeby dusíku na 1 tunu kukuřice se

vychází z maximálně možných výnosů (tj. pro VH1 - 40 t/ha, pro VH2 - 55 t/ha a pro VH3 - 55 t/ha + 30 %, tj. 71 t/ha). Ve VH1 je předpoklad spotřeby N na 1 tunu produkce 4,75 kg (= 190/40), ve VH2 4,0 kg (= 220/55) a ve VH3 3,4 kg (= 240/71).

Dávka hnojení N je také korigována pěstitelskými podmínkami (N z posklizňových zbytků předplodiny, předchozího organické hnojení živočišného i rostlinného původu apod., Klír et al. 2008). Například ve 2. roce po aplikaci digestátu a fugátu může být využito až 10-20 % N z aplikované dávky; u separátu se jedná až o 20-30%. Je důležité také přihlídnout k množství minerálního N v půdě na jaře před setím, a to zejména po předchozím suchém roce, kdy mohou v půdě zůstat značná množství reziduálního N (obzvláště po suché zimě). Pro tyto účely se odebírají půdní vzorky min. do hloubky 60 cm.

Do limitu hnojení je při hnojení digestátem a jeho složkami separace započítán pouze využitelný N, který byl v době testování postupů (2013 – 2016) nastaven na hodnotu 70 % z celkové dávky N u fugátu a digestátu a 30 % z celkové dávky N u separátu (minerální hnojiva 100 % využitelného N). Aktuální akční program (2016 - 2020) upravil podíl účinného N u digestátu a fugátu na 60 % (separát beze změny). Využitelnost dusíku je v akčním programu vztažena k minerálním hnojivům; může být tedy označena jako RHH (viz 3. Materiál a metody). Rozdíl mezi účinným a celkovým aplikovaným dusíkem představuje dusík, který není v daném roce nebo vůbec využit pro tvorbu výnosu, tzn. je to část dusíku, která zůstala v půdě v organické či anorganické formě, byla imobilizována mikroorganismy, vyplavena do vod, denitrifikována či unikla ve formě NH_3 .

Pro zpětné ověření správného hnojení je doporučována bilance živin (rozdíl mezi množstvím živin v aplikovaných hnojivech a sklizenými z pole), která je v případě dusíku důležitá pro posouzení účinnosti aplikovaných hnojiv. Klír a kol. (2016) uvádějí jako přípustný průměrný roční bilanční přebytek N za podnik max. 60 kg N/ha z.p.

Tato metodika na základě výzkumných poznatků odvodila v optimálně srážkovém roce (2013) využitelnost N pro fugát 80 %, pro digestát 50 % a separát 30 %. Různá využitelnost dusíku vychází z různého obsahu organických látek (fugát, digestát 3-6 %, separát až 19 %) a C:N, kdy hnojiva s nižším C:N (fugát, digestát) uvolňují živiny rychleji (2 roky). Naopak separát s vysokým C:N mineralizuje pomalu (až 3 roky), neboť dostupnost N v půdě pro mikroorganismy je limitována jeho imobilizací.

Podmínkou pro efektivní dávkování digestátu a maximální využití jeho hnojivých vlastností je pravidelné sledování jeho kvality, a to v rozsahu: obsah celkové sušiny, obsah organické sušiny, obsah N-NH₄, obsah celkového N, P, K, Ca, Mg, S a Na. Analýza těžkých kovů není nutná z důvodu jejich silně podlimitních obsahů (dle vyhl. č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva). Rozbor digestátu (resp. jeho složek separace) by měl být prováděn alespoň 2-3 x ročně. Vzhledem k rozmanitému složení vstupních surovin do fermentoru se může složení digestátu výrazně odlišovat od průměrného složení uvedeného ve vyhlášce č. 377/2013 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv. Jednotné používání hodnot z uvedené vyhlášky může vést k nedostatečnému nebo naopak k nadbytečnému zásobování půd živinami a snižování efektivity využití digestátu a jeho složek separace. Přehnojování vede nejen ke zbytečným ztrátám živin do podzemních vod a ovzduší, ale rovněž zvyšuje riziko zhoršování půdní struktury (rozplavení půdních agregátů v důsledku vysokého obsahu jednomocných kationtů v půd jako jsou NH₄⁺, K⁺, Na⁺).

Pro účinné využití aplikovaného dusíku je nutné minimalizovat ztráty volatilizací NH₃. Před aplikací digestátu je nutné zohlednit předpověď počasí. Nelze aplikovat digestát před očekávanými intenzivními srážkami, ale mírný déšť po aplikaci digestátu je vhodný pro omezení ztrát NH₃. Digestát a fugát je podle DZES 4 nutné zapravit nejpozději do 24 hodin po aplikaci nebo do 48 hodin po aplikaci separátu. Předpokládá se, že po roce 2020 bude povinné okamžité zapravení. Pokud je aplikována druhá dávka (přihnojení)

hadicovými aplikátory, není v současné době zapravení vyžadováno. Předpokladem pro celkové zvýšení využití N a tím i výnosu ve srovnání s jednorázovou dávkou je však zapravení i této dávky.

Způsob aplikace (dělení dávek, příp. přidavek inhibitoru nitrifikace) závisí na půdně-klimatických podmínkách. Jednorázové dávky jsou vhodnější pro těžší méně promyvné půdy s dostatečnou sorpční schopností pro amonné ionty. Jednorázová dávka by měla být zapravena hlouběji, aby se živiny nekoncentrovaly v povrchové půdní vrstvě a klíčící rostlinky nebyly poškozovány volným NH_3 , a také, aby nedocházelo k nadměrnému prokořenění vrchní vrstvy půdy na úkor celkového objemu kořenového systému. Jednorázové dávkování je výhodné kvůli nižším nákladům na pohonné hmoty, nižšímu utužení půdy pojezdy zemědělských strojů a snadnému zapravení.

Dělené dávky jsou vhodné zejména do promyvnějších mělkých půd, kde existuje vyšší riziko vyplavení dusíku. Nespornou výhodou je rovnoměrnější distribuce a lepší využití živin pro kukuřici s nižším rizikem ztrát dusíku na začátku vegetačního období, kdy jsou požadavky kukuřice na množství živin nízké. Nižší koncentrace živin na počátku vegetačního období je vhodnější pro vývin mladých rostlinek. Předpokladem vysoké efektivity využití živin u dělených dávek je optimální distribuce srážek a zapravení hnojiva do půdy, což není vždy proveditelné z technických důvodů.

V sušších (nepromyvných) oblastech je lepší zapravit hnojiva hlouběji, aby se podpořil růst kořenů v době, kdy je ještě k dispozici více vláhy.

K digestátu a fugátu lze také pro zvýšení účinnosti využití aplikovaného dusíku zejména v promyvných půdách přidávat inhibitor nitrifikace, který brání přeměně amonných iontů na pohyblivé dusičnany. Pro jeho optimální působení je vhodné hlubší zapravení (15 - 25 cm) s určitým časovým odstupem od setí, čímž se omezí negativní působení volného amoniaku na zdravotní stav klíčících rostlinek (zejména v půdách s nízkou sorpční

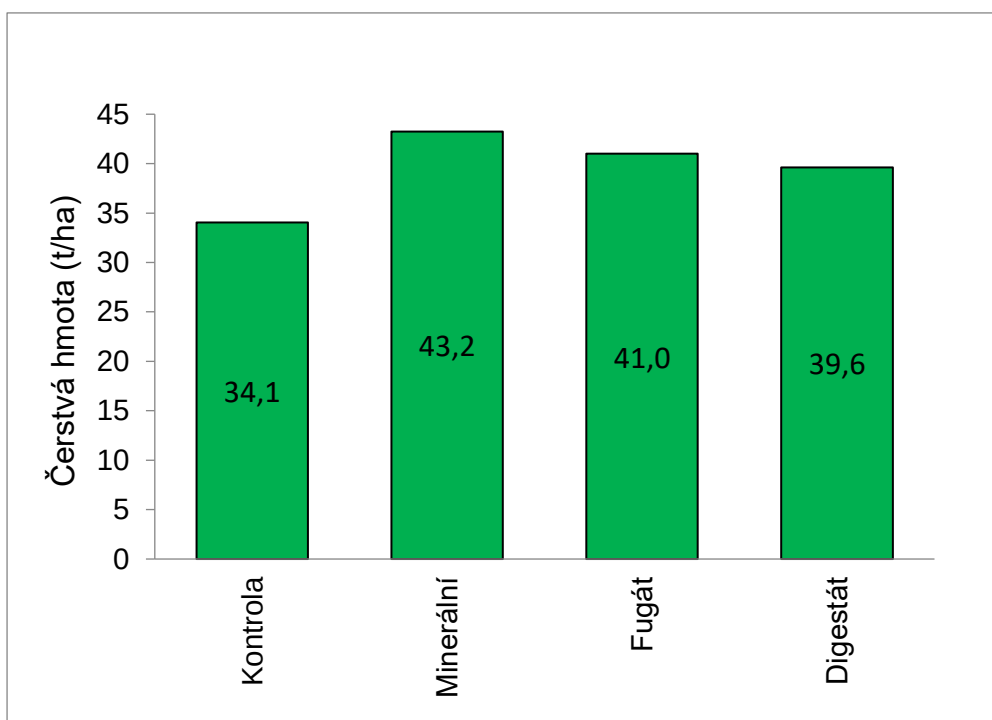
kapacitou) a podpoří nárůst kořenové hmoty do větší hloubky. Inhibitor je možné použít při jednorázové dávce digestátu či fugátu a tím zamezit neefektivním ztrátám dusičnanů na počátku vegetace a oddálit využití dusíku na pozdější období. Při použití inhibitoru lze celkovou zjištěnou dávku dusíku i navýšit (cca o 20 %, ale max. do limitu hnojení pro VH), neboť účinnějším využitím dusíku vzniká reálný předpoklad pro významné zvýšení výnosu. Zvýšené aplikace digestátu a fugátu spolu s inhibitorem částečně řeší i problém přeplněných jímek na začátku vegetačního období. Aplikace inhibitoru je tudíž v účincích srovnatelná s dělením dávek, ale šetří náklady spojené s dvojitou aplikací hnojiv, které jsou vyšší než vynaložené na nákup inhibitoru nitrifikace (700-900 Kč/ha). Očekávaný účinek inhibitoru nitrifikace je však vázaný na dostatek půdní vláhy.

A) Jednorázová dávka fugátu a digestátu

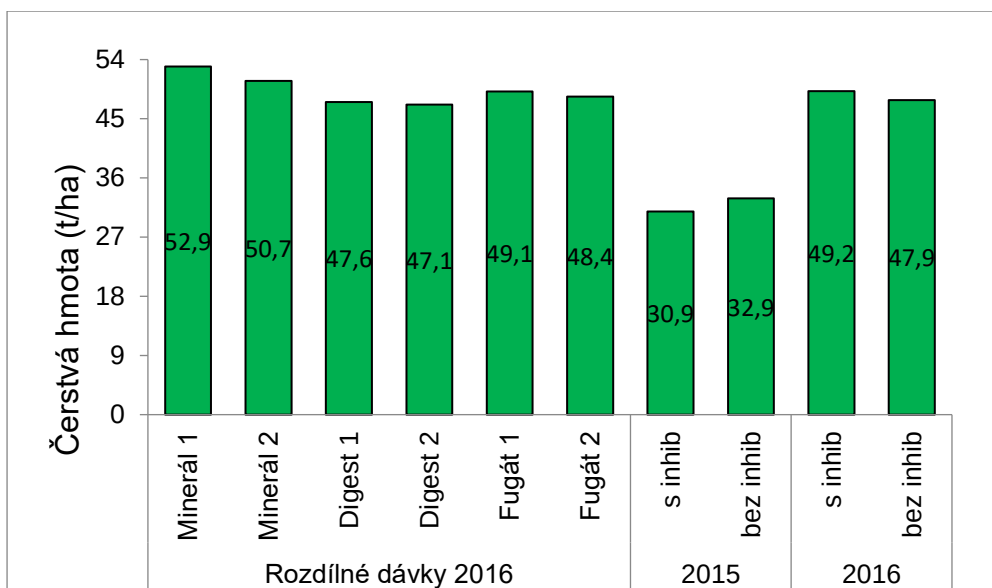
Hnojiva jsou aplikována jednorázově před setím.

Ve srážkově normální až silně vlhké vegetační sezóně jsou pro tvorbu výnosu lépe využity živiny z fugátu s vyšší aktuální i potenciální přístupností dusíku (vyšší obsah N-NH_4 a nižší C:N) ve srovnání s digestátem. V srážkově podnormálních letech jsou výnosy po aplikaci digestátu a fugátu obdobné. Po aplikaci fugátu je výnos v průměru o 2-5 % nižší a po aplikaci digestátu o 5-10 % nižší ve srovnání s jednorázovou dávkou minerálních hnojiv (suchý rok 1x za 4 roky, obr. 3). Toto relativně malé snížení výnosu neodpovídá zjištěné RHH digestátu a fugátu (50 a 80 %) ve srovnání s minerálními hnojivy (100 %). Disproporci mezi RHH a výnosy lze vysvětlit tím, že kukuřice hnojená minerálními hnojivy nemá pouze vyšší výnos, ale i vyšší koncentrace N ve srovnání s porosty hnojenými fugátem či digestátem. Zvýšení dávky celkového N o 30 % u digestátu a fugátu se jeví spíše jako rizikové z hlediska ztrát dusíku a předpokladem jeho efektivního využití je, jak již bylo několikrát uvedeno, optimální distribuce srážek podle požadavků kukuřice.

Přídavek inhibitoru nitrifikace v suchých letech výnos snižuje, neboť dusík se kumuluje v povrchové nejsušší vrstvě půdy a rostliny trpí nedostatkem přístupného dusíku (obr. 4). Ve vlhčích letech (2016) se však velmi dobře osvědčila aplikace inhibitoru při zvýšených dávkách fugátu (zvýšení výnosu o 6 %, tj. 2,7 t/ha). Využitelnost dusíku (ANR) ve vláhově normálních podmínkách je u minerálních hnojiv 50 - 55 % (RHH 100 %), po hnojení fugátem cca 20 - 40 % (RHH 60 - 80 %) a po hnojení digestátem cca 20 - 30 % (RHH 30 - 50 %). Na 1 tunu sklizené biomasy bylo spotřebováno 3,9 kg N po aplikaci minerálních hnojiv a 3,4 kg N po aplikaci fugátu a digestátu. Nižší spotřeba N na tunu produkce u fugátu a digestátu odpovídá nižší akumulaci (koncentraci) N ve sklizené biomase. Přídavkem inhibitoru nitrifikace u zvýšených dávek N (180 kg N) se zvýšila spotřeba N na 1 tunu u fugátu z 3,9 na 4,1 a u digestátu z 3,6 na 3,7 kg N.



Obrázek 3. Průměrné výnosy čerstvé hmoty kukuřice (t/ha) hnojené jednorázově různými hnojivy ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec 2013-2016 (předplodina obilovina)



Obrázek 4. Průměrné výnosy čerstvé hmoty kukuřice (t/ha) hnojené jednorázově odlišnými dávkami (1 = 140 kg N/ha, 2 = 180 kg N/ha) různých hnojiv a po aplikaci inhibitoru nitrifikace, Lukavec 2015-2016

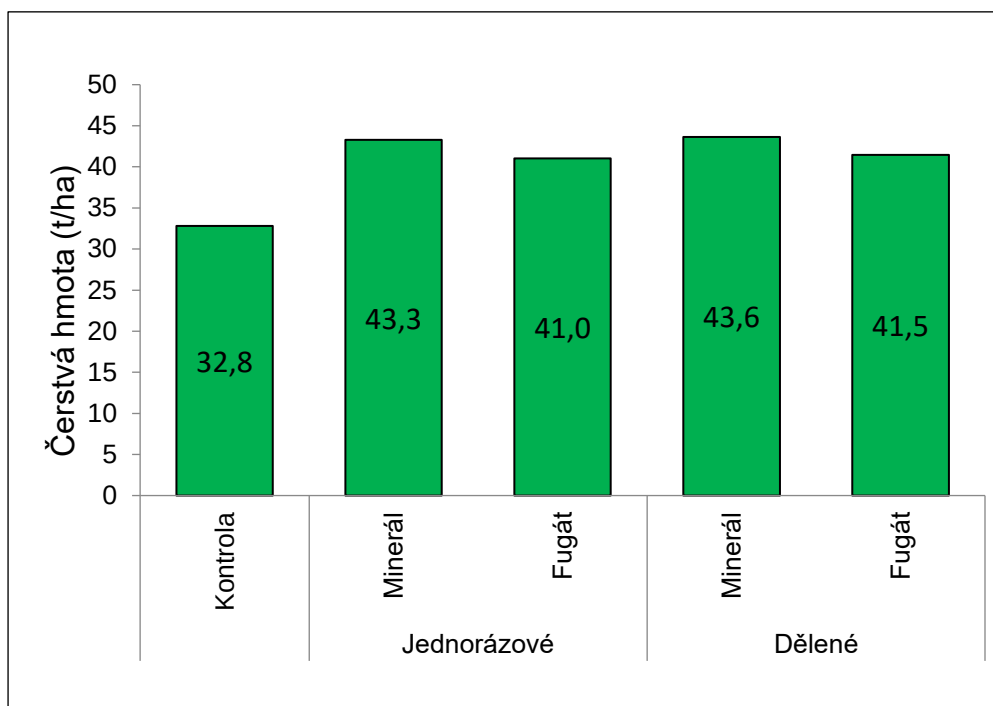
B) Dělená dávka fugátu a digestátu

Hnojiva jsou aplikována ve dvou dělených dávkách: 55-60 % z celkové dávky před setím s okamžitým zapravením a zbytek ve fázi 4.-5. lístku.

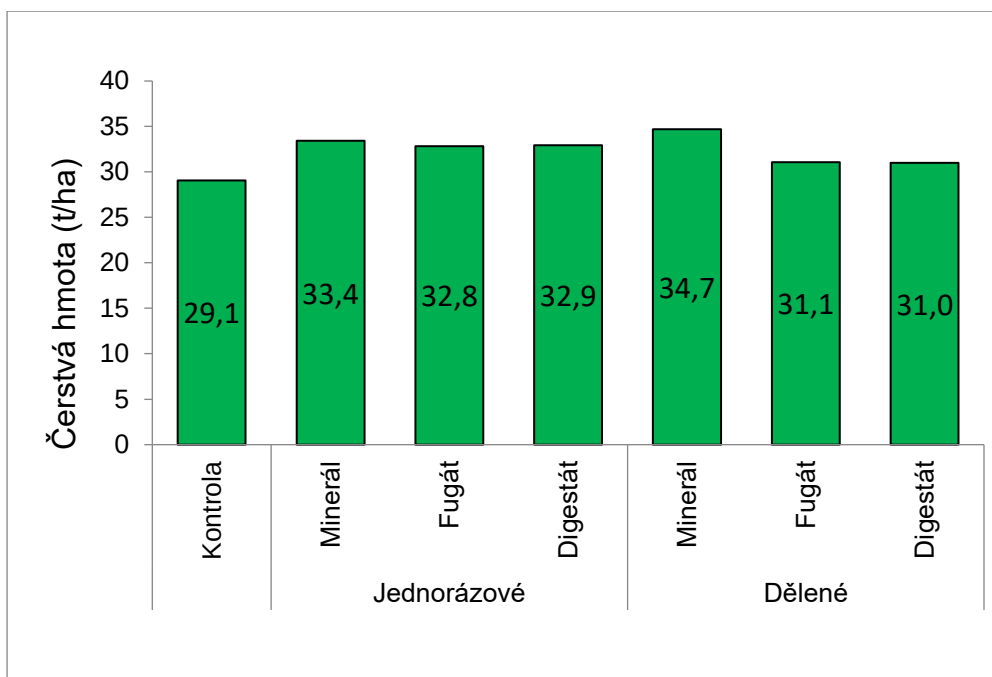
Dělené dávky fugátu nezajistí ve vlhčích letech ve srovnání s jednorázovou dávkou výrazně lepší využití živin pro tvorbu výnosu (obr. 5), neboť část N je po 2. aplikaci fugátu bez zapravení ztracena v důsledku volatilizace NH_3 , jejíž riziko se zvyšuje při vyšších teplotách vzduchu a deficitu srážek. Existuje i riziko ztráty N po vysokých srážkách, které následují brzy po aplikaci. Dělená dávka fugátu ve srovnání s jednorázovou zvýšila ANR pouze o 2-5 %. Při podnormálních srážkách dělení dávek fugátu, digestátu i minerálních hnojiv má negativní dopad na dostupnost živin v půdě pro rostliny v rozhodujícím období růstu ve srovnání s jednorázovými dávkami, což se odráží ve snížení výnosu (o 4 - 5 %, obr. 6). Vyšší provozní náklady a riziko utužení půdy spojené s dvojitou aplikací hnojiv, kdy druhá dávka není zapravena, nejsou

opodstatněné adekvátním zvýšením výnosu. V případě zapravení druhé dávky lze očekávat výrazně vyšší efektivitu využití N pro tvorbu výnosu.

Poznámka: V suchém roce se dělení dávek jeví jako rizikové z hlediska možného výskytu zdravotních problémů při výživě skotu, a to pokud po přihnojení zůstanou na listech kukuřice zaschlé zbytky hnojiva (riziko šíření výskytu škodlivých bakterií a parazitů, např. rody *Clostridium* a *Cryptosporidium*). Z tohoto hlediska je v suchých letech vhodnější přihnojení minerálními hnojivy (eliminace volatilizace a zdravotních problémů skotu) nebo využití kukuřičné siláže pro výrobu bioplynu.



Obrázek 5. Průměrné výnosy čerstvé hmoty kukuřice (t/ha) po aplikaci jednorázových a dělených dávek minerálních hnojiv a fugátu ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec 2013-2014 (vlhčí roky)



Obrázek 6. Průměrné výnosy čerstvé hmoty kukuřice (t/ha) po aplikaci jednorázových a dělených dávek minerálních hnojiv, fugátu a digestátu ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec 2015 (suchý rok)

C) Aplikace separátu s přihnojením minerálními hnojivy

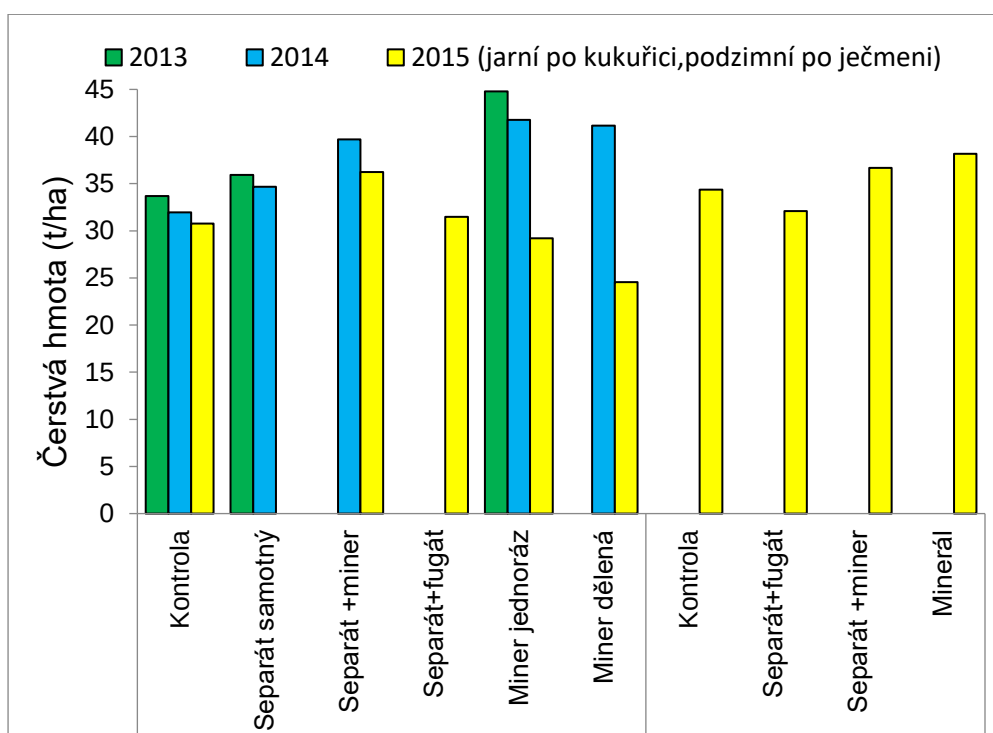
Separát je aplikován na podzim (do termínu zákazu hnojení N látkami podle klimatických regionů), příp. na jaře před zasetím kukuřice, a to dávkou 55-60 % z celkové plánované dávky N. V obojím případě je dohnojeno minerálními hnojivy buď před setím (při podzimní aplikaci separátu) nebo ve fázi cca 4.-5. lístku (při jarní aplikaci separátu), a to dávkou 40-45 % celkové plánované dávky N.

Aplikace separátu s přihnojením minerálními hnojivy zajišťuje výnosy kukuřice srovnatelné s aplikací minerálních hnojiv (obr. 7). Zejména během sezóny s podnormálními srážkami zabezpečuje zvýšení obsahu organické hmoty aplikací separátu i vyšší výnosy ve srovnání s dělenou dávkou minerálních hnojiv. Aplikace samotného separátu bez přihnojení minerálními hnojivy nebo

s přihnojením fugátem nezajistí pro tvorbu výnosu dostatek minerálního N (obr. 7).

Ve vlhčích letech bylo ANR po hnojení samotným separátem pouze 25-30 % (RHH 25-40 %), přihnojení minerálními hnojivy zvýšilo RHH na 90 %.

Poznámka: Samotná aplikace separátu nezajišťuje přijatelné výnosy kukuřice, avšak jeho aplikace přináší nesporné výhody pro kvalitu půdy (zvýšení obsahu organické hmoty, vodoretenční půdní kapacity, zlepšení půdní struktury, Möller a Müller 2012).



Obrázek 7. Průměrné výnosy čerstvé hmoty kukuřice (t/ha) po jarní a podzimní aplikaci separátu (samotný, s přihnojením minerálními hnojivy či fugátem) a minerálních hnojiv ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec 2013 – 2015

4.2. Postupy pro minimalizaci vyplavení dusičnanů do vod

Vyplavení dusičnanů do vod je ovlivněno množstvím a distribucí srážek, teplotou vzduchu, půdním typem, čerpáním živin porostem, obsahem půdního minerálního dusíku, množstvím, distribucí a formou hnojiv a jejich reakcí s dalšími látkami (např. sláma obilovin, inhibitor nitrifikace).

K omezování ztrát N-NO_3 vyplavením do vod přispívá dodržování postupů uvedených v bodě 4. 1.

Obecně prospěšnější z hlediska vyplavení N-NO_3 do vod jsou dělené dávky, které zajistí rovnoměrnější distribuci živin pro potřeby porostu a sníží tak riziko ztrát v období nízkého čerpání živin porostem (tj. do aplikace druhé dávky digestátu či fugátu). Snížení ztrát N-NO_3 do vod lze během vegetační sezóny také zajistit inhibitorem nitrifikace aplikovaným společně s digestátem. V případě snížené dostupnosti vody pro porost však inhibitor zamezí pohybu dusíku ke kořenům, což vede k nižšímu plodinovému výnosu. Z tohoto důvodu je vhodné inhibitor zapravovat do větších hloubek (15-20 cm).

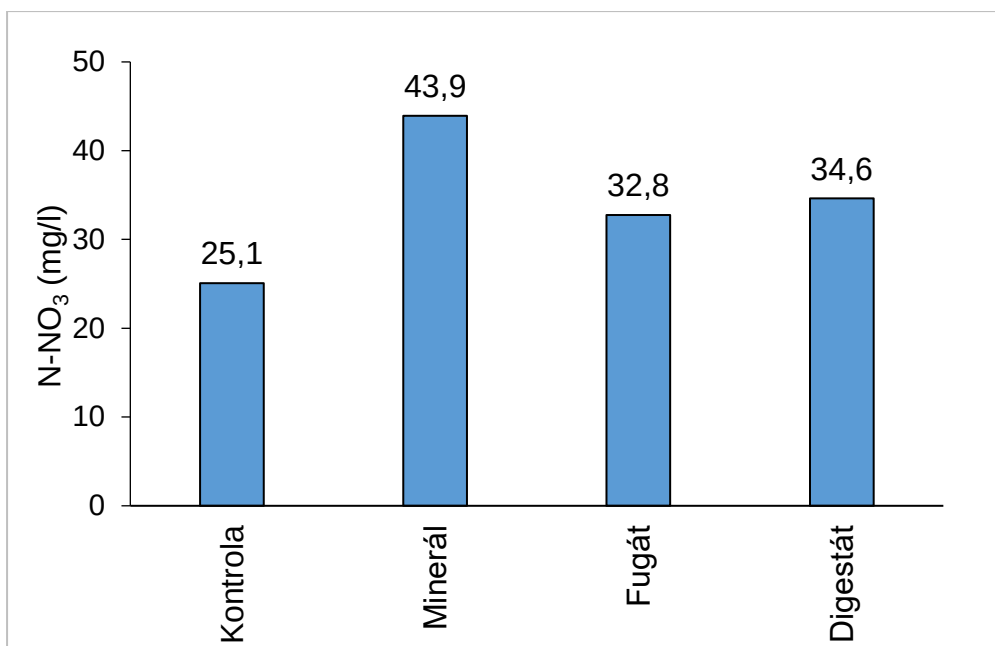
Po sklizni kukuřice zůstává v půdě reziduální minerální dusík, a to obzvláště po suché vegetační sezóně, kdy velké množství dusíku nevyužitého rostlinami zůstává v půdě a v následujícím období je vystaven riziku vyplavení ve formě N-NO_3 . Riziko ztrát N-NO_3 je v tomto období sníženo založením ozimých obilnin nebo mezipločin, které částečně reziduální dusík čerpají. Z mezipločin jsou doporučovány zejména nevymrzající (např. triticales či svatojánské žito, Svoboda et al. 2015), pro jejichž založení lze lépe dodržet termín výsevu (do konce září či poloviny října) ve srovnání s mezipločinami vymrzajícími (do 15.9.). Rovněž je nutné dodržet dávky digestátu či fugátu podle AP uvedené v akčním programu NS v tabulce 6 přílohy 2 (Maximální celková dávka N v období po sklizni hlavních plodin), kdy je možné pro ozim, mezipločinu nebo rozklad slámy po kukuřici (strniště vysoké min. 40 cm) aplikovat 120 (I. AP), 100 (II. AP) nebo 80 (III. AP, půdy se středním rizikem infiltrace) a 80 (k mezipločinám či rozkladu slámy), resp. 0 (k ozimu) kg celkového N/ha (III. AP,

půdy s vysokým rizikem infiltrace). Výhody aplikace digestátu či fugátu společně se slámou a inhibitorem nitrifikace budou uvedeny v kap. 5.3.

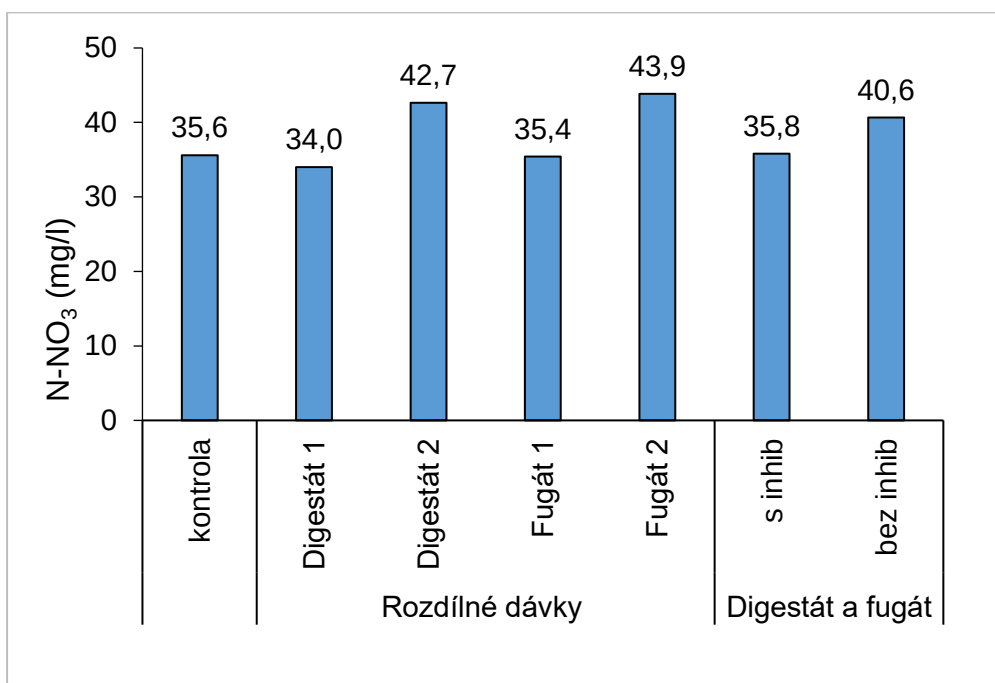
A) Jednorázová dávka fugátu a digestátu

Během vegetační sezóny je distribuce srážek zásadním faktorem, který ovlivňuje vyplavení N-NO_3 . Odchytky rozložení srážek od optimální potřeby vody kukuřici vedou dříve či později ke ztrátám N-NO_3 vyplavením. To znamená, že rizikové nejsou jenom vysoké srážky, které bezprostředně ovlivňují ztráty dusičnanů, ale i suché období, kdy se N hromadí v půdě a může být vyplaven až po sklizni kukuřice. Ztráty dusičnanového N po aplikaci digestátu a fugátu jsou během srážkově normální či nadnormální vegetační sezóny obdobné a ve srovnání s minerálními hnojivy nižší (obr. 8). Ve srážkově normálním roce inhibitor nitrifikace aplikovaný společně s digestátem a fugátem snižuje riziko vyplavení dusičnanů (obr. 9). Zvýšení celkových dávek digestátu a fugátu o 30 % (zohlednění využitelného N) má za předpokladu, že rozložení srážek není z hlediska potřeb kukuřice optimální, negativní dopad na vyplavení N-NO_3 . Toto dokládá obr. 9, který znázorňuje vyšší vyplavení N-NO_3 po aplikaci 180 kg N/ha ve fugátu či digestátu způsobené srážkami na počátku vegetačního období, které nebyly využity porostem a infiltrovaly do půdy.

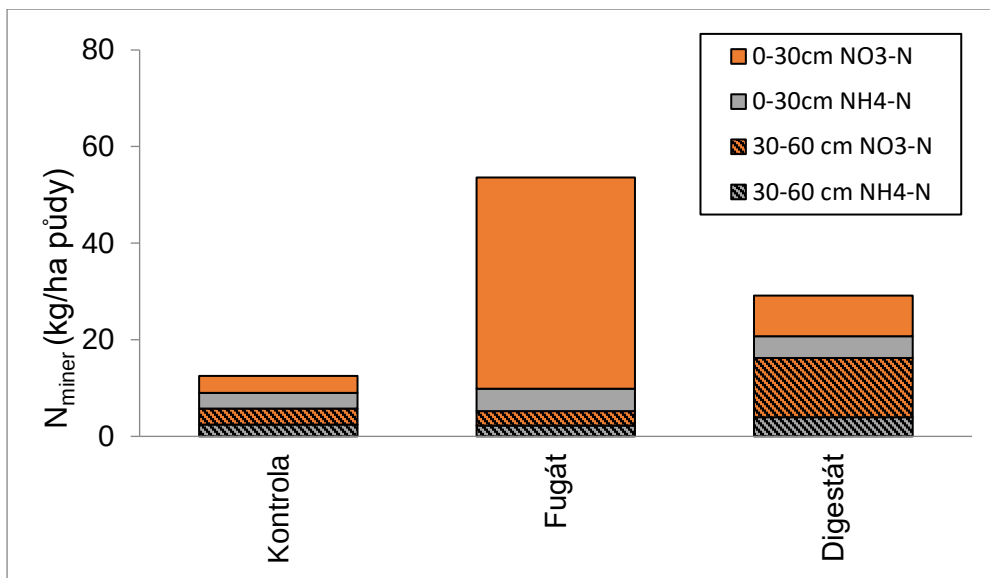
Po sklizni kukuřice ve srážkově podnormální vegetační sezóně je výrazně vyšší riziko vyplavení minerálního N než v letech vlhkých či srážkově normálních. Zejména po aplikaci fugátu byl prokázán výrazně vyšší obsah minerálního dusíku v půdě (obr. 10). Zvýšení celkových dávek digestátu a fugátu o 30 % zvyšuje obsah reziduálního N v půdě ve srovnání s nenavýšenými dávkami v případě, že aplikovaný N není z důvodu optimální distribuce srážek využit pro tvorbu výnosu (obr. 11). Inhibitor v suchém roce zvyšuje obsah reziduálního dusíku v půdě, v normálním roce nemá vliv na obsah půdního reziduálního minerálního dusíku (obr. 11).



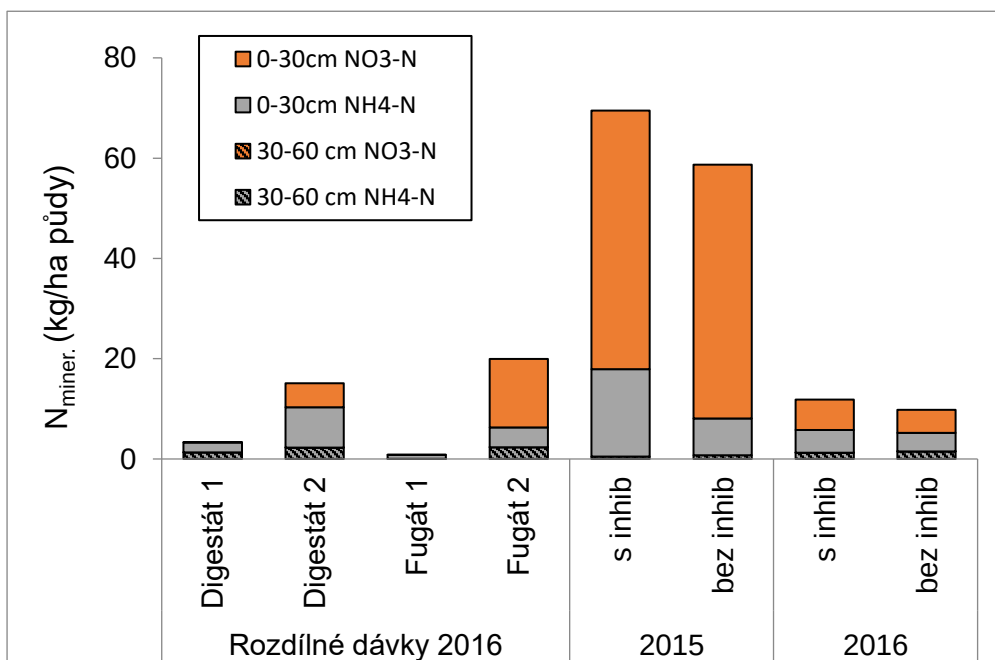
Obrázek 8. Průměrné koncentrace N-NO₃ v půdních vodách po jednorázových dávkách minerálních hnojiv, fugátu a digestátu ve srovnání s kontrolou, sukční kelímky, Lukavec, 2013, 2014, 2016



Obrázek 9. Průměrné koncentrace N-NO₃ v půdních vodách po jednorázových rozdílných dávkách digestátu a fugátu a aplikaci inhibitoru nitrifikace, sukční kelímky, Lukavec, 2016



Obrázek 10. Průměrné obsahy půdního reziduálního minerálního dusíku po sklizni kukuřice po jednorázových dávkách, Lukavec 2013 – 2016. Zvýšené množství dusíku u fugátu je způsobeno suchým rokem 2015 (99 kg Nmin/ha, ve vlhkých letech 2013, 2014 a 2016 průměr 17 kg Nmin/ha).

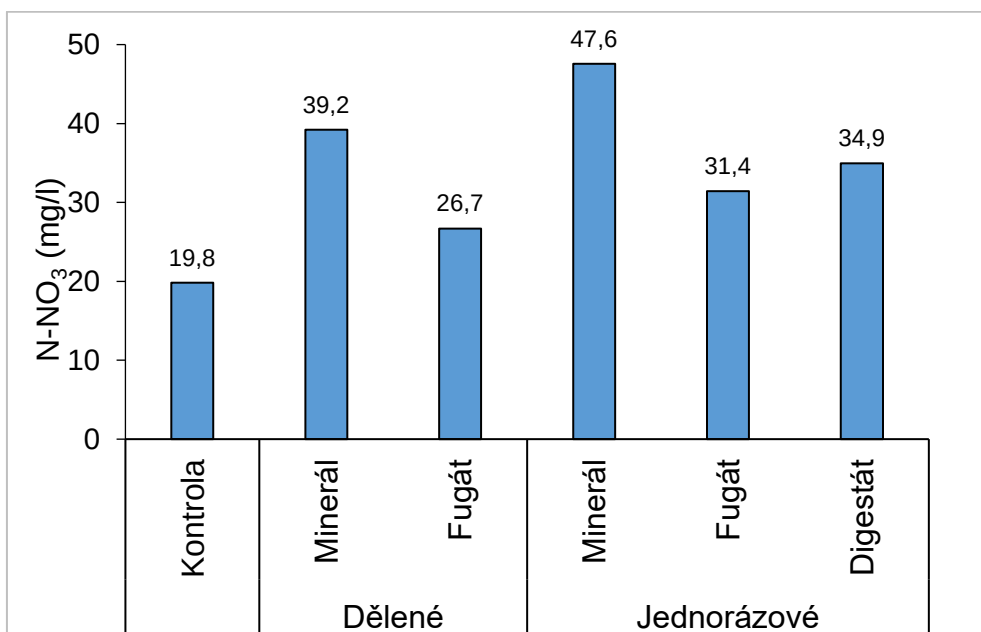


Obrázek 11. Průměrné obsahy půdního reziduálního minerálního dusíku po sklizni kukuřice po rozdílných dávkách a přidavku inhibitoru v suchém (2015) a srážkově normálním roce (2016), Lukavec 2015 – 2016

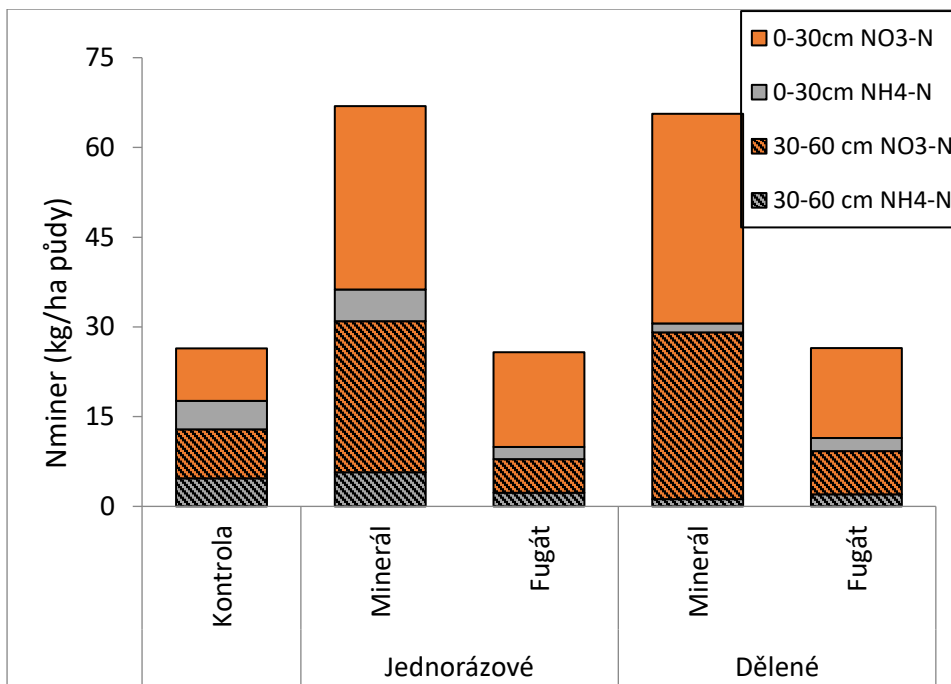
B) Dělená dávka fugátu a digestátu

Dělení dávek fugátu během srážkově silně vlhké vegetační sezóny snižuje vyplavení N-NO_3 ve srovnání s jednorázovou dávkou fugátu (obr. 12). Po aplikaci dělené dávky fugátu bylo vyplavení nižší než po aplikaci dělené dávky minerálních hnojiv.

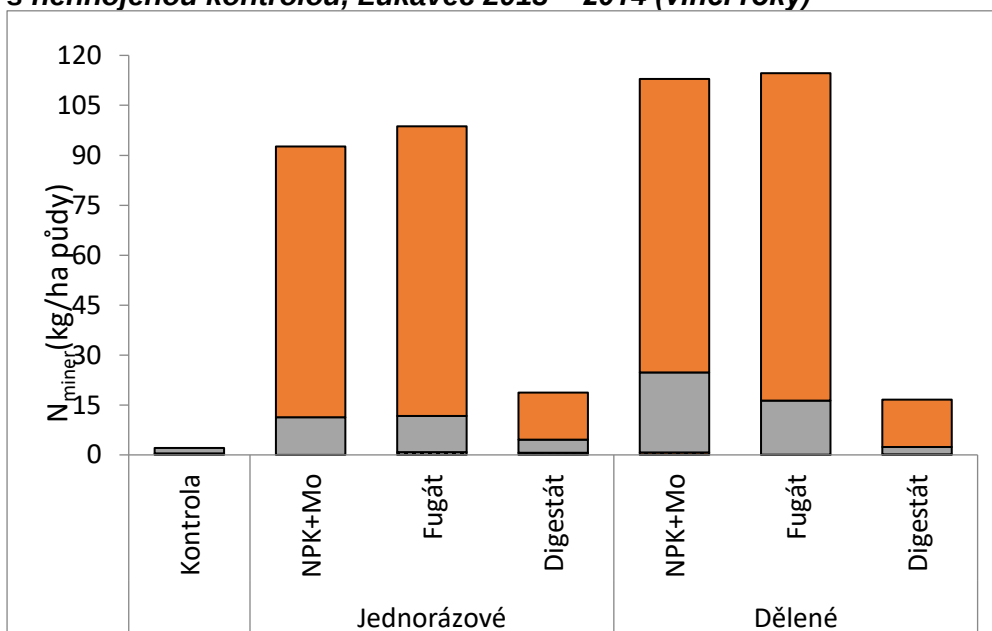
Po sklizni kukuřice ve srážkově silně vlhkém roce nemá dělení dávek fugátu vliv na obsah reziduálního N (obr. 13), naopak v suchém roce dělená dávka fugátu zvyšuje riziko vyplavení N-NO_3 po sklizni ve srovnání s jednorázovou dávkou (obr. 14). Minerální dusík je v tomto případě méně využit pro tvorbu výnosu a vyšší podíl zůstává v půdním profilu.



Obrázek 12. Průměrné koncentrace N-NO_3 v půdních vodách po hnojení jednorázovými a dělenými dávkami ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec, sukční kelímky, 2013 a 2014



Obrázek 13. Průměrné obsahy půdního reziduálního minerálního dusíku po sklizni kukuřice po jednorázových a dělených dávkách ve srovnání s nehněnou kontrolou, Lukavec 2013 – 2014 (vlhčí roky)

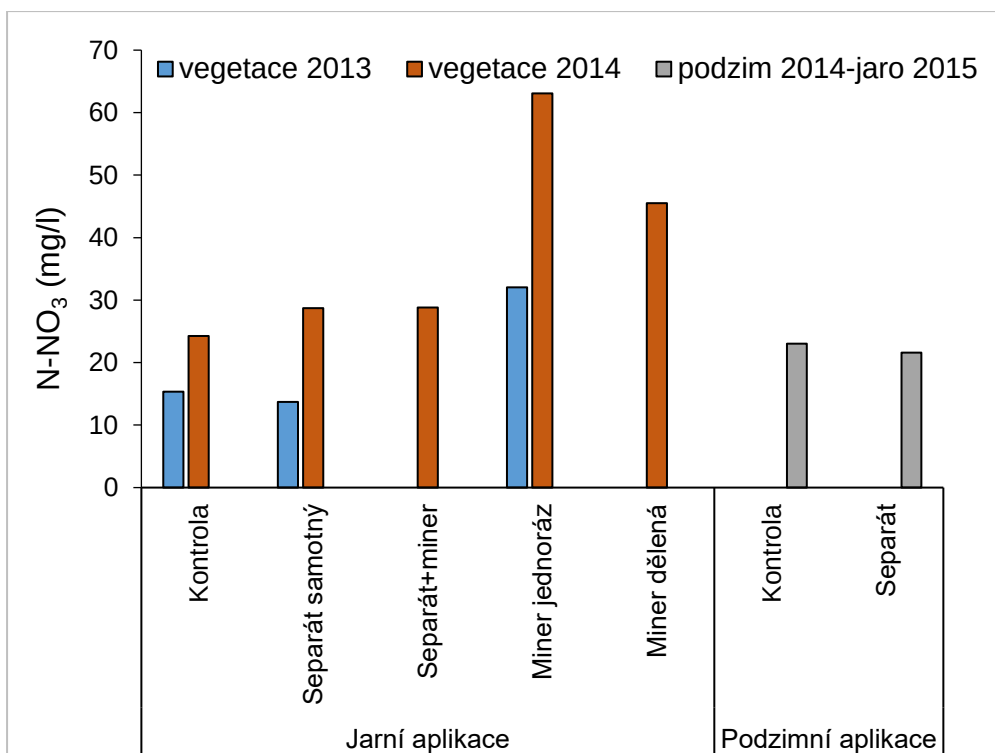


Obrázek 14. Průměrné obsahy půdního reziduálního minerálního dusíku po sklizni kukuřice po jednorázových a dělených dávkách ve srovnání s nehněnou kontrolou, Lukavec 2015 (suchý rok)

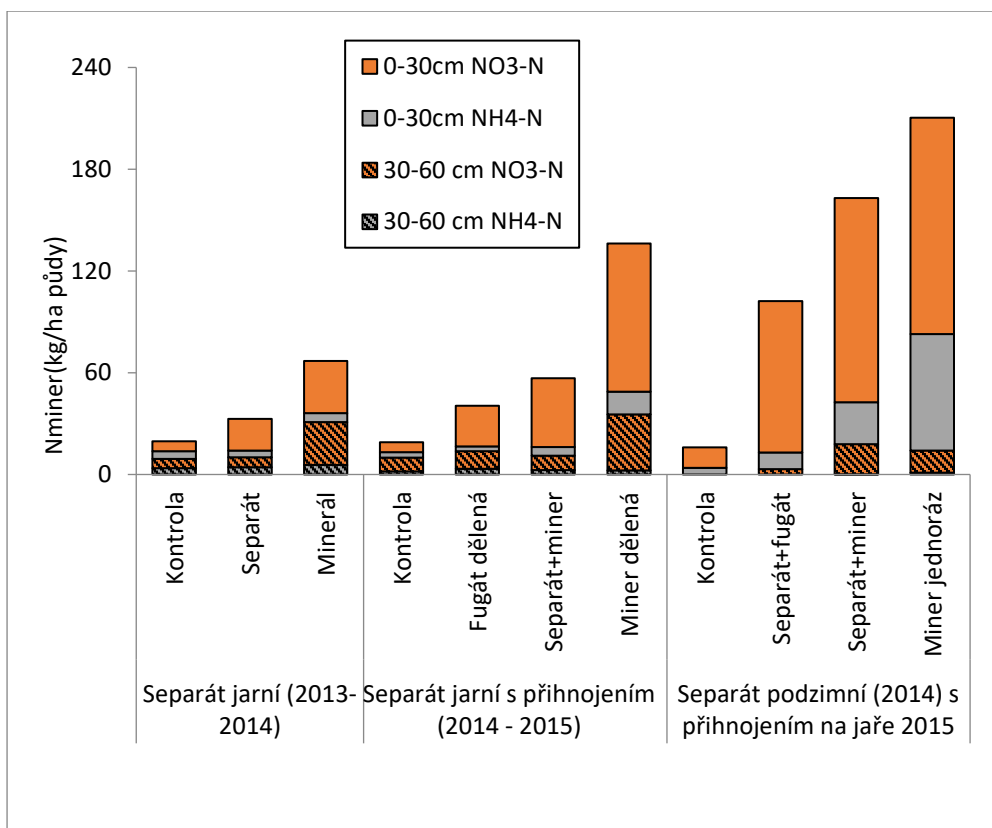
C) Aplikace separátu s přihnojením minerálními hnojivy

Během vegetační sezóny aplikace separátu výrazně minimalizuje riziko vyplavení N-NO_3 do podzemních vod (obr. 15) podporou mikrobiální imobilizace. Vyplavení N-NO_3 po jednorázové aplikaci separátu (bez minerálních hnojiv) je výrazně nižší ve srovnání s jednorázovou dávkou minerálních hnojiv, fugátu a digestátu a mírně vyšší se srovnání s nehnojenou kontrolou. Vyplavení N-NO_3 po aplikaci separátu s přihnojením močovinou je nižší než po aplikaci dělené dávky minerálních hnojiv, srovnatelné s dělenou aplikací fugátu a vyšší ve srovnání s nehnojenou variantou. Vyplavení N-NO_3 po podzimní aplikaci separátu je v mimovegetačním období nízké, tj. srovnatelné s nehnojenou kontrolou.

Po sklizni kukuřice je riziko vyplavení N-NO_3 po aplikaci separátu s přihnojením minerálními hnojivy nižší ve srovnání s dělenou aplikací minerálních hnojiv a vyšší než po aplikaci dělené dávky fugátu (obr. 16). Zvýšené riziko vyplavení půdního reziduálního N souvisí s pozvolnou mineralizací organické hmoty, která se neslučuje s nároky na příjem živin porostem.



Obrázek 15. Průměrné koncentrace N-NO₃ v půdních vodách po aplikaci separátu (samotný, s minerálními hnojivy) a minerálních hnojiv ve srovnání s nehnojenou kontrolou, sukční kelímky, Lukavec, 2013 - 2015.



Obrázek 16. Průměrné obsahy půdního reziduálního minerálního dusíku po sklizni kukuřice po aplikaci separátu (samotný, s minerálními hnojivy a fugátem), fugátu a minerálních hnojiv ve srovnání s nehnojenou kontrolou, Lukavec 2013-2015

5. Vliv digestátu na půdní vlastnosti a vyplavení dusičnanů do drenážních vod

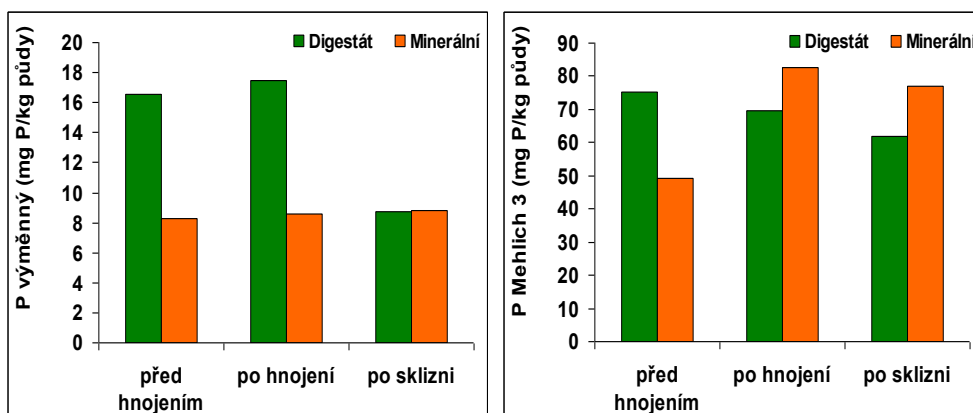
5.1. Obsahy přístupných makroprvků a mikroprvků

Digestát, fugát a separát obsahují kromě dusíku i značné množství dalších živin, zvláště P, K, Mg, ale i některé mikroprvky důležité pro výživu rostlin jako je Cu a Zn, které jsou obsaženy v krmivech zvířat. Změny obsahu živin v půdě byly prokazatelné oběma použitými metodami (metoda KVK-UF - výluh octanu amonného a metoda Mehlich 3). Kritéria zásoby živin v půdách jsou v současnosti dána vyhláškou č. 275/1998 Sb., která obsahuje kritéria pro

zásoby fosforu, draslíku, hořčíku a vápníku, ale nikoliv pro mikroprvky. Metodou KVK-UF jsou stanoveny výměnné podíly prvků v půdě. Tyto podíly jsou pro rostlinu snadno dostupné a zvýšení jejich obsahu v půdě je předpokladem pro jejich vyšší příjem rostlinou.

V porovnání s obsahy živin v půdě po minerálním hnojení se obsahy živin po aplikaci digestátu a případně fugátu nebo separátu zvýšily.

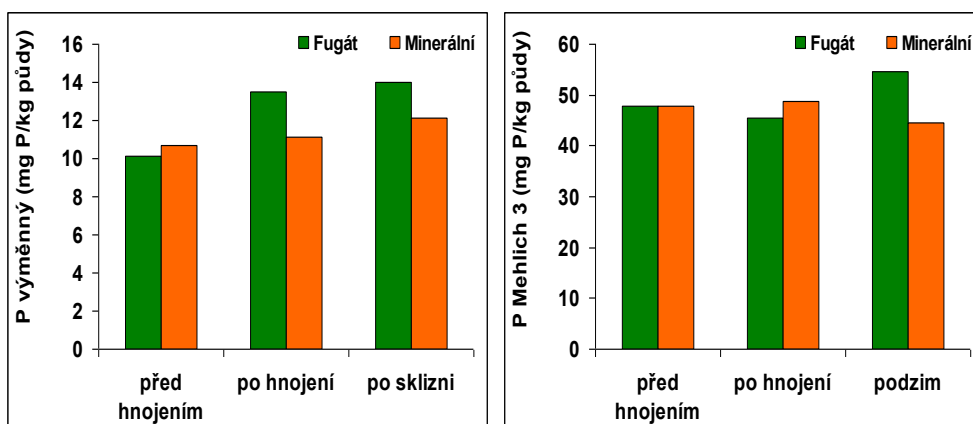
Provozní pokusy v Podmokách a Vepříkově ukázaly, že zásoba výměnného P v půdách se zvýšila zejména po přidavku digestátu, v menší míře po aplikaci fugátu (obr. 17, 18).



Obrázek 17. Obsah fosforu (výměnné formy, Mehlich 3), Podmoky 2013-2015, hloubka 0-30 cm

Digestát se osvědčil jako další zdroj živin podstatný pro růst rostlin, zvláště pak hnojení zvyšovalo obsah lehce dostupných výměnných forem P, zatímco metodou Mehlich 3 nárůst obsahu P v půdách po hnojení digestátem nebo fugátem nebyl prokazatelný. Po aplikaci digestátu může existovat vyšší riziko vyplavení P, což ukazují vyšší obsahy výměnného P po předchozím hnojení digestátem, kdy v jarním období byly zaznamenány více než dvojnásobné obsahy P v půdě. Toto znamená, že v testovaných půdách se může po předchozím hnojení digestátem nacházet až o 29 kg P, resp. téměř 68 kg P_2O_5 /ha více než u půdy hnojené minerálními dusíkatými hnojivy. Při aplikaci fugátu se v případě lokality Vepříkov ukazuje nutnost přiměřeného dohnojení

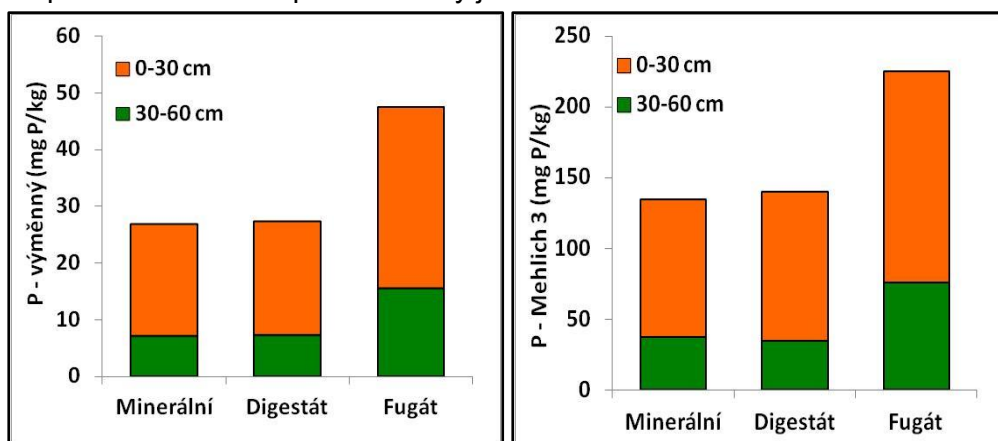
P minerálními hnojivy, nicméně v daném případě provozního pokusu by byla potřeba nejdříve vyvápnit půdy a udržovat přiměřené hodnoty pH 6-6,5 pro adekvátní dostupnost P v půdě. Při separaci tekuté a tuhé složky více P zůstává v separátu než ve fugátu. Běžné stanovení P podle metody Mehlich 3 ani jedno z rizik dostatečně nezohledňuje. Nicméně podle kritérií agrochemického zkoušení půd lze obsah P na lokalitě Vepříkov považovat za nízký.



Obrázek 18. Obsah fosforu (výměnné formy, Mehlich 3), Vepřikov 2013-2015, hloubka 0-30 cm

Dosažené výsledky z polního pokusu v Lukavci potvrzují data z provozního pokusu v tom smyslu, že zde byly průměrné vyšší obsahy vodorozpuštěného P zjištěny v půdách po aplikaci fugátu a v případě digestátu byly zjištěny vyšší obsahy vodorozpuštěného fosforu v době sklizně (obr. 20). Výsledky podle metody Mehlich 3 potvrdily vyšší obsah P po aplikaci fugátu (obr. 19). Současně byl v průběhu roku zjištěn nárůst obsahu vodorozpuštěného P ve vrstvě 30-60 cm, zejména po aplikaci fugátu, kdy postupně mineralizoval organický fosfor a postupně se uvolňoval do hlubších vrstev půdy (obr. 20). Pokud jde o riziko vyplavení, v polním pokusu bylo zjištěno, že v jarním období 2016 bylo mezi 7-22 % vodorozpuštěného fosforu ve vrstvě půdy 30-60 cm, kdy vyšší hodnoty byly zjištěny zejména pro půdy hnojené fugátem. Při

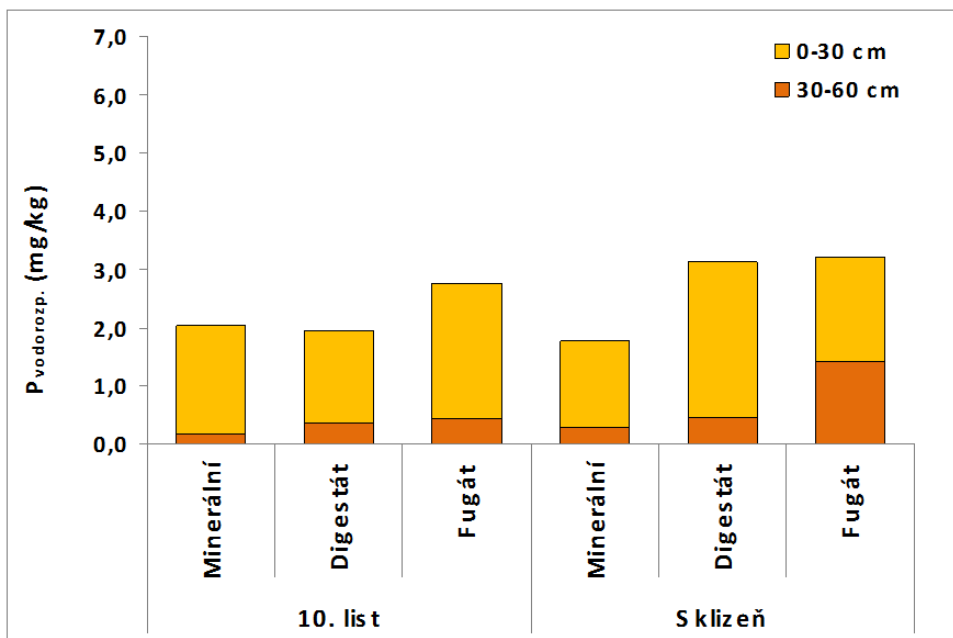
sklizni tento podíl ve vrstvě 30-60 cm stoupl na 16,5-45,8% vodorozpustného P. Riziko vyplavení části fosforu aplikovaného v digestátu a zejména ve fugátu do podzemních vod v průběhu zimy je tudíž reálné.



Obrázek 19. Obsah fosforu (výměnné formy, Mehlich 3), Lukavec podzim 2016

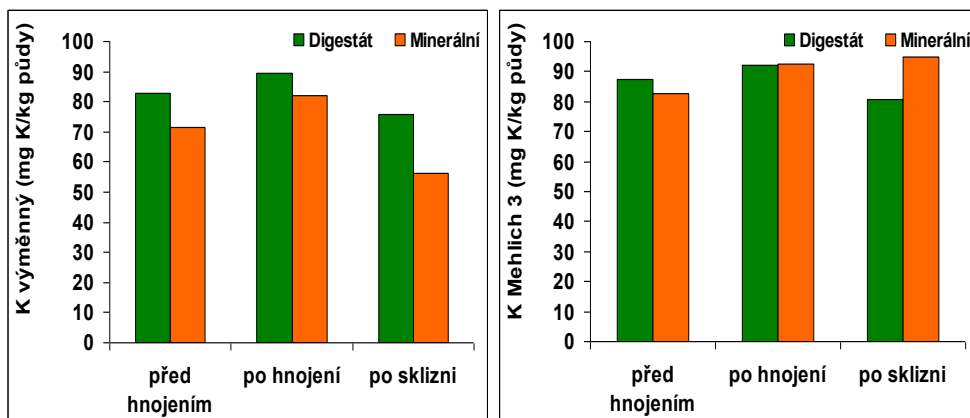
Fugát a zejména digestát jsou zdrojem P potřebného pro výživu rostlin, a proto by částečně mohly nahrazovat drahá minerální fosforečná hnojiva, jejichž spotřeba je v zemědělských podnicích nízká. Dosažené výsledky nicméně zatím nepotvrzují přímý vliv P obsaženého v digestátu nebo fugátu na kvalitu produkce. Protože zvláště v případě fugátu část fosforu zůstává v separované tuhé složce, část fosforu se po aplikaci fugátu může mineralizovat z původní půdní zásoby, což v důsledku může znamenat snížení zásoby fosforu v půdách. Polní pokus také ukázal na určité riziko vyplavení části fosforu aplikovaného ve fugátu do podzemních vod, kdy k nárůstu obsahu vodorozpustného P v půdě došlo zejména na konci vegetačního období.

Lze proto doporučit v jarním období občasnou kontrolu půd hnojených pravidelně digestátem a fugátem v některé z oblastních laboratoří na obsah labilních forem fosforu, například vodorozpustného, a tomu přizpůsobit celkové dávky hnojení.



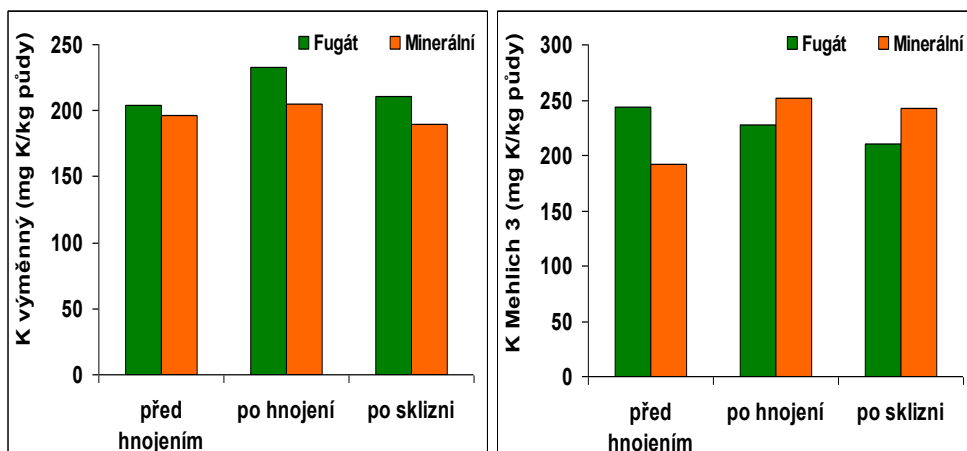
Obrázek 20. Obsah vodorozpuštného fosforu (mg/kg), Lukavec 29.6. a 26.9.2016

Obsah K se v půdách po aplikaci digestátu a fugátu zpravidla zvyšuje, nicméně podobných výsledků lze dosáhnout také při minerálním hnojení dusíkem (obr. 21 a 22).



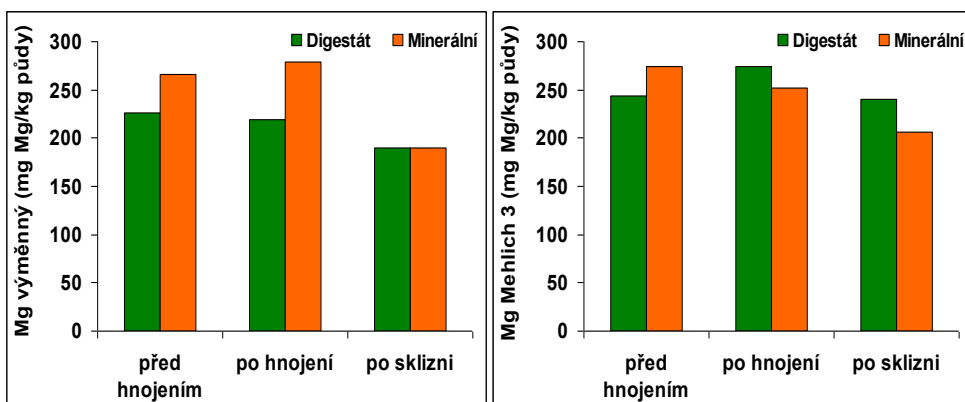
Obrázek 21. Obsah draslíku (výměnné formy, Mehlich 3), Podmokly 2013-2015, hloubka 0-30 cm

Draslík jako jednomocný kationt může být v půdě značně mobilní a je vázán více na jílovité minerály. Z tohoto pohledu je nutné nejen zohlednit celkovou dávku K dodanou ve fugátu nebo digestátu, ale při minerálním hnojení i příjem K rostlinou, a tím jeho odnos z půdy.

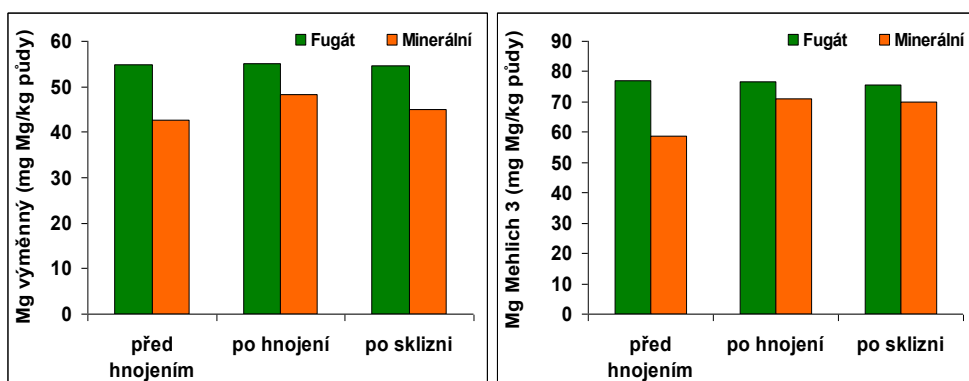


Obrázek 22. Obsah draslíku (výměnné formy, Mehlich 3), Vepříkov 2013-2015, hloubka 0-30 cm

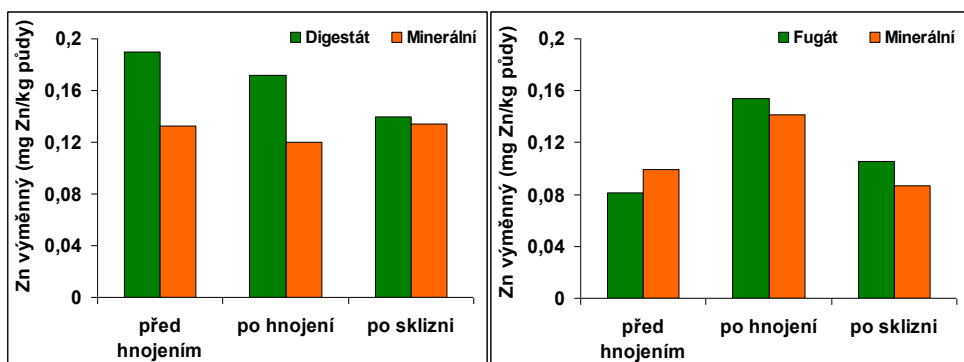
Po aplikaci fugátu se v půdě ve srovnání s minerálními hnojivy vyskytovalo více dostupného Mg než po aplikaci digestátu (jarní období, obr. 23 a 24). Toto nebylo jednoznačně potvrzeno metodou Mehlich 3. Na lokalitě Podmoky bylo v půdě obsaženo zhruba 4-5 x více Mg než na lokalitě Vepříkov (obr. 23, 24). Z tohoto pohledu je podstatné sledovat dlouhodobé obsahy Mg v půdě a přiměřeně hnojit v adekvátním množství k plodině.



Obrázek 23. Obsah hořčíku (výměnné formy a Mehlich 3), Podmoky 2013-2015, hloubka 0-30 cm

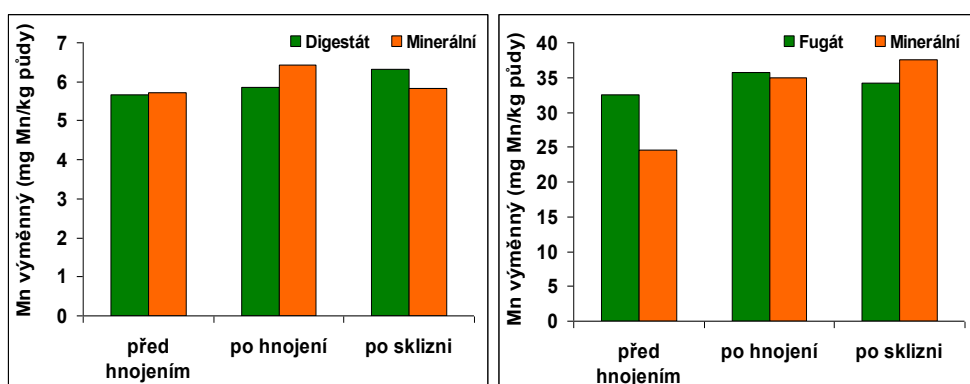


Obrázek 24. Obsah hořčíku (výměnné formy a Mehlich 3), Vepřikov 2013-2015, hloubka 0-30 cm

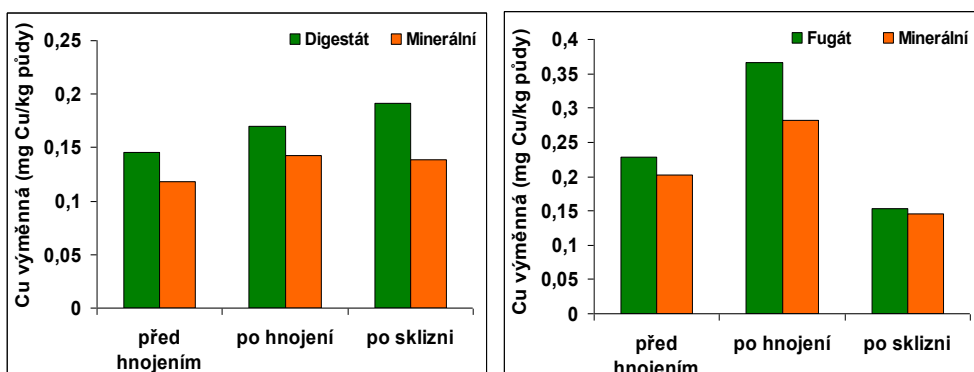


Obrázek 25. Obsah zinku (výměnné formy), Podmoky (vlevo) a Vepřikov, 2013-2015, hloubka 0-30 cm

Digestát je vhodnější zdroj mikroelementů než fugát. Po aplikaci digestátu byly zjištěny vyšší obsahy dostupného Zn a v menší míře i Cu, zatímco vliv aplikace digestátu nebo fugátu na obsah Mn v půdě se neprojevil (obr. 25, 26 a 27). Mikroelementy se vyskytují v kejdě hospodářských zvířat jako součásti receptury směsí pro bioplynové stanice, v důsledku se vyskytují i v digestátech, případně ve fugátech. V současnosti neexistují přesná kritéria hodnocení zásoby mikroprvků podle metody Mehlich 3, na obrázcích jsou proto znázorněny obsahy snadno dostupných mikroprvků ve výluhu octanu amonného. Všechny tyto prvky v digestátu mohou být vzhledem k přítomnosti kejdy nebo hnoje obsaženy a je vhodné s nimi při kalkulaci hnojiv počítat.



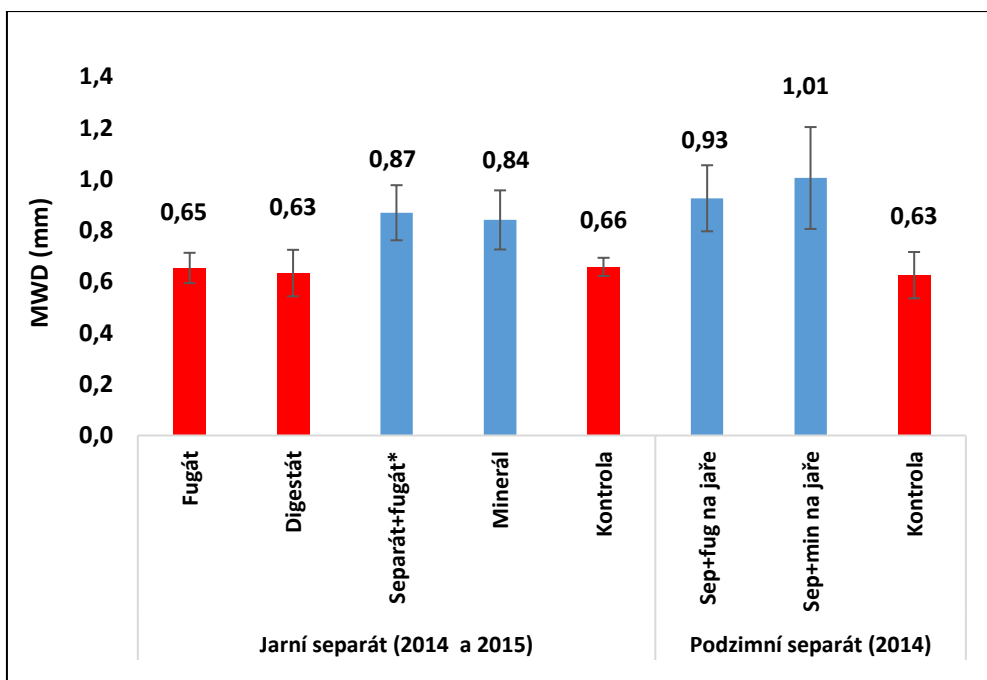
Obrázek 26. Obsah manganu (výměnné formy), Podmoky (vlevo) a Vepřikov 2013-2015, hloubka 0-30 cm



Obrázek 27. Obsah mědi (výměnné formy), Podmoky (vlevo) a Vepřikov 2013-2015, hloubka 0-30 cm

5.2. Půdní struktura

Na jaře 2014 a 2015 byl opakovaně na stejné parcelky aplikován separát v množství 38,8 t/ha (2014) a 22,5 t/ha (2015, s následným přihnojením fugátem) a na podzim 2014 bylo na jiné parcelky (po ječmeni) aplikováno 21,7 t/ha. Aplikace separátu měla výrazně pozitivní vliv na stabilitu půdní struktury zvýšením průměrné velikosti půdních agregátů o jednu kategorii (tab. 3), a to z kategorie nestabilní půdní struktury s velikostí půdních agregátů 0,4-0,8 mm (obr. 28, červené sloupce) na kategorii mírně nestabilní (0,8-1,3 mm, modré sloupce). Nestabilní půdní strukturu měly kromě nehnojené kontrolní varianty i varianty hnojené fugátem a digestátem. Pozitivní vliv separátu na stabilitu půdní struktury lze vysvětlit vysokým obsahem organické hmoty (15 %, 5 x více než fugát) a zejména jejími složkami jako jsou celulóza, lignin a huminové látky reagujícími přímo s půdním povrchem. Rovněž lze uvažovat i strukturotvorný vliv vápníku v separátu (0,16 % vs. fugát 0,10 %), jehož množství v celkové aplikované dávce je cca 2 x vyšší než u fugátu. Zlepšení stability půdní struktury přináší i zvýšení infiltrace, pórovitosti, retenční vodní kapacity a snižuje náchylnost půdy k vodní erozi. Ačkoliv uvedené výsledky pocházejí pouze z krátkodobých 1-2 letých pokusů, které by bylo nutné potvrdit dalším výzkumem, přesto se jedná o cenné a nové informace, které naznačují dopady aplikace digestátu a jeho složek separace.



Obrázek 28. Průměrná velikost půdních agregátů různých zrnitostních frakcí (mm) na vybraných variantách, Lukavec, červenec 2015

**na jaře 2014 pouze separát, na jaře 2015 separát s přihnojením fugátem*

Tabulka 3. Hodnocení stability půdní struktury pomocí průměrné velikosti půdních agregátů různých zrnitostních frakcí

MWD	stabilita půdní struktury	tvorba povrchové krusty	odtok a mezirýhová eroze
0,8 - 1,3 mm	mírně nestabilní	častá	proměnné riziko závislé na klimatických a topografických parametrech
1,3 - 2,0 mm	stabilní	občasná	omezené riziko
> 2 mm	vysoce stabilní	velmi vzácná	velmi nízké riziko

5.3. Půdní organická hmota

Organická hmota, která je obsažena v digestátu a jeho složkách separace, je poměrně stabilizovaná, to znamená, že její snadno rozložitelná část byla v anaerobním fermentoru přeměněna na bioplyn (kap. 1. 2. c). S aplikací digestátu se sice do půdy organická hmota dostává, ale nemá iontovýměnnou

schopnost jako humus. Např. aplikací digestátu s obsahem sušiny 4-10 % se dostává do půdy 6-12 kg C.t⁻¹ ve formě částečně stabilizované organické hmoty, která má dobré předpoklady, že její část se bude transformovat do stabilních humusových látek. Tento předpoklad bude naplněn, pokud bude současně probíhat mineralizace, která je pro mikroorganismy realizující humifikaci zdrojem potřebné energie. Během humifikace dochází velice pomalu k syntéze látek (velkých molekul polymeračními a polykondenzačními reakcemi), při kterých se spotřebovává energie. Humifikovaná organická hmota má obecně 5-7 x vyšší iontovýměnnou kapacitu než půdní jílové koloidní částice.

Proto, aby mineralizace a humifikace mohly probíhat jako paralelní procesy, je nutné podpořit rozvoj mikroorganismů snadno rozložitelnou organickou hmotou. Z tohoto hlediska je vhodná sláma, která je dobrým zdrojem organického lehce rozložitelného C a jejíž rozklad je podporován snadno dostupným N z digestátu v amonné formě, která je mikroorganismy upřednostňována. Proto zapravení slámy na podzim současně s aplikací digestátu je považováno za vhodný postup, kterým zemědělec může přispět k zachování organické hmoty v půdě. Pokud bude přidán i inhibitor nitrifikace, zvýší se dostupnost N v amonné formě pro mikrobiální činnost a tím i rozklad slámy a současně se omezí vyplavení dusičnanů v mimovegetačním období. Pokud by však v souvislosti s aplikací digestátu nebyla do půdy zapravena žádná jiná snadno rozložitelná organická látka, existuje reálné nebezpečí, že obsah organické hmoty v půdě bude postupně klesat.

Čtyři roky sledování obsahů půdní organické hmoty (obsah celkového půdního dusíku, obsah organického oxidovatelného uhlíku) v rámci provozních pokusů byly příliš krátkou dobou na to, aby se prokázaly rozdíly mezi aplikací fugátu či digestátu a minerálních hnojiv. Zdůvodňování tohoto faktu by bylo čirou spekulací, neboť existuje množství faktorů, které mají vliv na množství půdní organické hmoty kromě hnojení (vodní režim, půdní typ, meteorologické podmínky jednotlivých ročníků, množství posklizňových

zbytků v půdě ovlivněných hnojením, způsob zpracování půdy, např. orba snižuje obsah půdní organické hmoty, apod.).

5.4. Koncentrace a odnosy dusičnanového N v drenážních vodách

Vliv využití fugátu na jakost drenážních vod a velikost odnosu N-NO_3 drenážním odtokem byl zkoumán na dvou drenážních skupinách pokusné lokality Vepříkov (ZOD Kámen) s rozdílným způsobem hnojení v jednotlivých sledovaných sezónách. Jedná se o drenážní skupinu Vepř. 1, jejíž mikropovodí má velikost 19,95 ha a hnojena byla v letech 2013 a 2014 minerálními hnojivy a v letech 2015 a 2016 fugátem, a o drenážní skupinu Vepř. 2 s mikropovodím o výměře 28,25 ha, kde probíhalo hnojení opačným způsobem (2013 a 2014 fugát, 2015 a 2016 minerální hnojivo). Obě sledované drenážní skupiny mají podobnou velikost průměrného průtoku (0,57 l/s Vepř. 1, resp. 0,7 l/s Vepř. 2) i specifického odtoku (0,028 l/s/ha Vepř. 1, resp. 0,025 l/s/ha Vepř. 2), lze tedy velmi dobře porovnávat koncentrace a odnosy N-NO_3 při obou způsobech hnojení. Monitoring drenážních vod probíhal od června 2013 do října 2016.

Koncentrace N-NO_3 a odnos dusíku z povodí byly sledovány jednak pravidelnými odběry v přibližně dvoutýdenním intervalu, který zachycoval především běžné vodní stavy za převládajícího základního a svahového odtoku a potom také v průběhu srážko-odtokových epizod (SOE), kdy byly vzorky odebírány kvazi kontinuálně pomocí automatických vzorkovačů. Velikost průtoku byla v obou případech měřena kontinuálně. Srážko-odtokové epizody mají značný význam z pohledu koncentrací i odnosu N-NO_3 . Význam SOE spočívá jednak v prudkých změnách koncentrací N-NO_3 , ke kterým dochází v jejich průběhu, ale také ve velkém podílu na celkovém odtoku z mikropovodí a tím také na celkovém odnosu N-NO_3 .

Koncentrace dusičnanového dusíku N-NO₃

Charakteristiky koncentrací N-NO₃ v drenážních vodách obou drenážních skupin ze vzorků z pravidelných odběrů (běžné vodní stavy) i ze vzorků v průběhu SOE jsou zobrazeny v tab. 4 a obr. 29 a 30. Koncentrace N-NO₃ ve vzorcích z pravidelných odběrů se v průběhu sledovaného období pohybovaly na skupině Vepř. 1 v rozmezí mezi 13,7 a 35,1 mg/l (tab. 4), přičemž průtokově vážená koncentrace (C_{fw}) byla 24,2 mg/l. Na drenážní skupině Vepř. 2 (obr. 30) byly v průběhu sledovaného období koncentrace N-NO₃ podstatně nižší než na Vepř. 1 (obr. 29). V průběhu sledovaného období se pohybovaly v rozmezí 2,7-27,0 mg/l a hodnota C_{fw} byla 14,8 mg/l. Vzhledem k tomu, že koncentrace na Vepř. 2 byly nižší po celou dobu pokusu, způsob hnojení významně koncentraci N-NO₃ v drenážních vodách neovlivnil.

Na obou mikropovodích byl zaznamenán pouze malý rozdíl v koncentracích ve vegetační a nevegetační sezóně. Za běžných průtoků existuje pouze slabý vztah mezi koncentrací N-NO₃ a velikostí drenážního průtoku, když koncentrace obecně s rostoucím průtokem mírně klesaly.

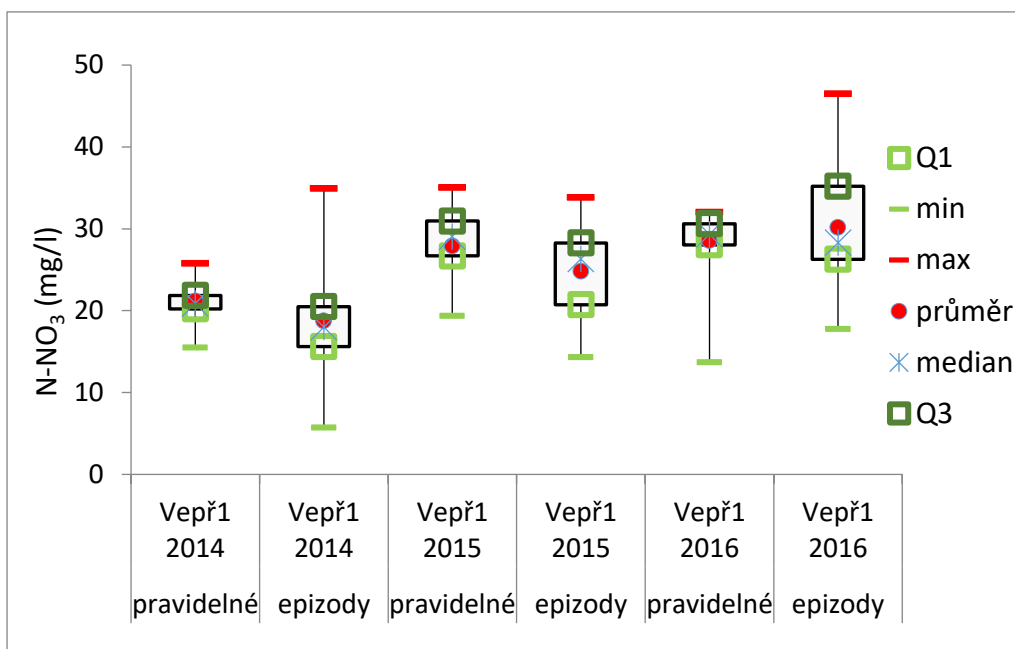
Koncentrace N-NO₃ v průběhu SOE vykazovaly značnou variabilitu, jejich velikost se pohybovala od 2,9 mg/l do 46,5 mg/l na profilu Vepř. 1 a od 1 mg/l do 54,6 mg/l na profilu Vepř. 2. Tato variabilita byla způsobena zejména měnícím se složením drenážního odtoku v průběhu SOE a množstvím dusičnanů v půdě před epizodou. V průběhu většiny sledovaných SOE došlo ke snižování koncentrací N-NO₃ v drenážních vodách s rostoucím průtokem (obr. 29, 30), což je situace typická pro většinu odvodněných subpovodí s ornou půdou, která není přehnojena. Výjimkou byla drenážní skupina Vepř. 1 v roce 2016, kdy koncentrace N-NO₃ v průběhu některých SOE byly vyšší, než ve vzorcích z pravidelných odběrů při běžných vodních stavech. Tato skutečnost s velkou pravděpodobností nebyla způsobena přehnojením půdy velkou dávkou dusíku aplikovanou tomto roce, ale zvýšenou zásobou N v půdě po předchozím relativně sušším roce (2015), ve kterém proběhlo pouze několik SOE a bylo čerpáno méně N porostem. Při srovnání obou drenážních

skupin je patrné, že koncentrace N-NO₃ se v průběhu SOE snižují intenzivněji na skupině Vepř. 2, což je způsobeno vyšší hydrologickou konektivitou tohoto mikropovodí. Tato skutečnost se projevuje mj. větším počtem zaznamenaných SOE, které jsou také více intenzivní a drenážní odtok v jejich průběhu obsahuje vyšší podíl vody pocházející z příčinné srážky (určeno pomocí velikosti změny teploty drenážní vody v průběhu SOE).

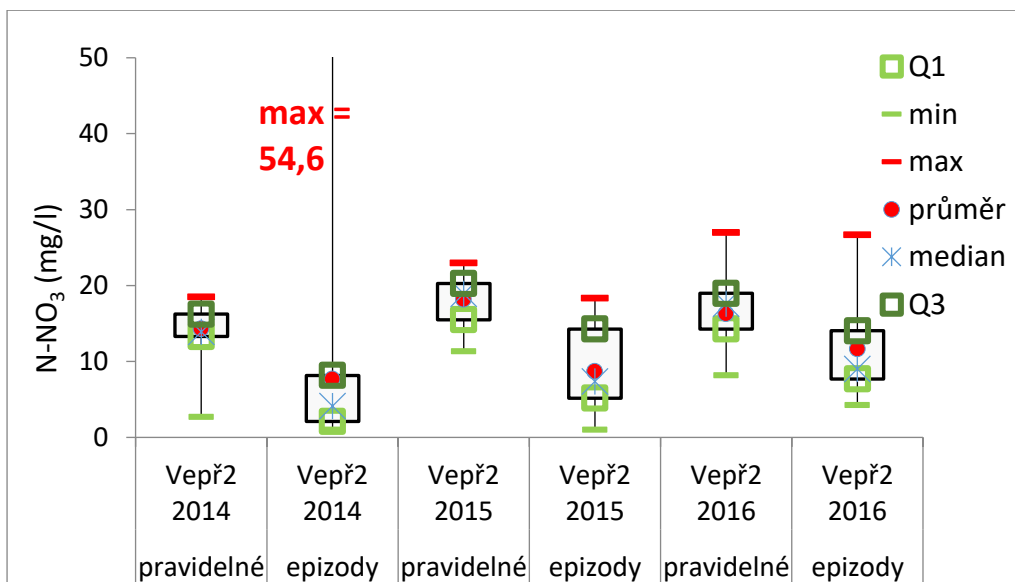
Z dlouhodobého hlediska vykazují koncentrace N-NO₃ na obou sledovaných drenážních skupinách rostoucí trend (obr. 31 a 32), a to ve vzorcích z pravidelných odběrů i ve vzorcích odebraných v průběhu SOE. Tento trend je více patrný na drenážní skupině Vepř. 1. Pravděpodobná příčina tohoto nárůstu je způsobena poklesem průměrného denního průtoku, který na Vepř. 1 poklesl z 0,72 l/s v období 2013 – 2014 na 0,45 l/s v období 2015 – 2016. Stejně tak na Vepř. 2 došlo ve stejných obdobích k poklesu průměrného denního průtoku z 0,92 l/s na 0,55 l/s. Největší nárůst koncentrací N-NO₃ tak byl zaznamenán především ve druhé polovině hydrologického roku (HR) 2015, který byl mimořádně suchý.

Tabulka 4. Charakteristiky koncentrací N-NO₃ v drenážních vodách z pravidelných odběrů a během SOE, Vepřikov. Cfw – průtokově vážená koncentrace, veget – vegetační sezóna, neveg – nevegetační sezóna

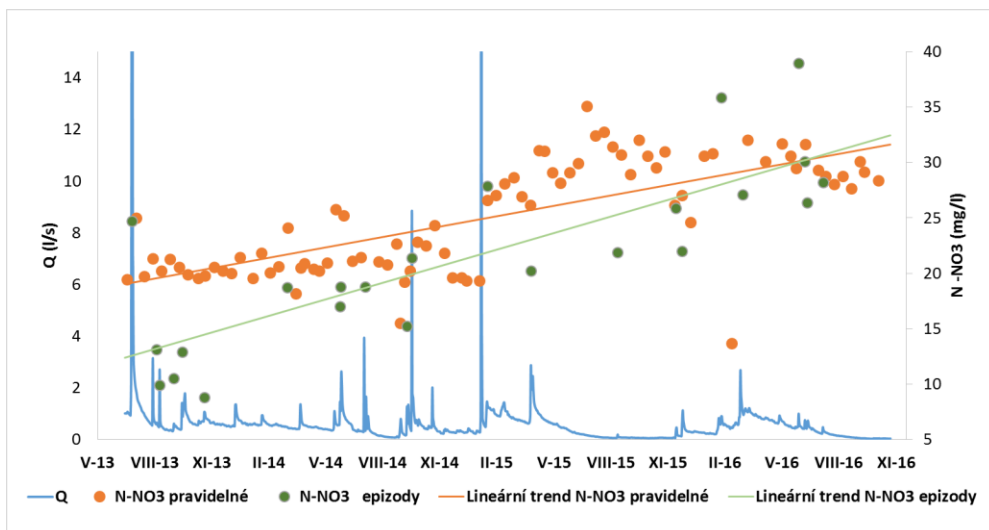
HR	Období	Vepř. 1						Vepř. 2					
		pravidelné (mg/l)			SOE (mg/l)			pravidelné (mg/l)			SOE (mg/l)		
		min	max	Cfw	min	max	Cfw	min	max	Cfw	min	max	Cfw
2014	HR	15,5	25,8	21,4	5,7	35,0	18,0	2,7	18,5	13,1	1,0	54,6	6,4
	veget	15,5	25,8	21,5	5,7	35,0	18,0	2,7	17,9	11,4	1,0	20,8	4,8
	neveg	18,2	24,1	21,3	18,3	19,7	18,6	8,3	18,5	14,9	2,4	54,6	11,9
2015	HR	19,3	35,1	27,5	14,3	33,9	23,8	11,3	23,0	18,4	1,0	18,4	5,7
	veget	28,1	35,1	30,4	21,5	22,4	21,8	15,5	23,0	21,1	5,6	10,4	7,5
	neveg	19,3	30,6	25,9	14,3	33,9	23,9	11,3	20,4	17,4	1,0	18,4	1,7
2016	HR	13,7	32,1	29,0	17,7	46,5	31,4	8,1	27,0	15,7	4,2	26,7	12,9
	veget	27,7	31,7	30,3	20,7	46,5	32,6	14,4	20,8	17,7	4,2	26,7	14,5
	neveg	13,7	32,1	27,2	17,7	36,5	29,0	8,1	27,0	14,1	6,2	16,3	9,4
celé období	vše	13,7	35,1	24,2	2,9	46,5	18,5	2,7	27,0	14,8	1,0	54,6	7,6
	veget	15,5	35,1	24,7	2,9	46,5	17,8	2,7	23,0	14,6	1,0	26,7	7,3
	neveg	13,7	32,1	23,7	4,2	36,5	22,3	8,1	27,0	15,0	1,0	54,6	8,4



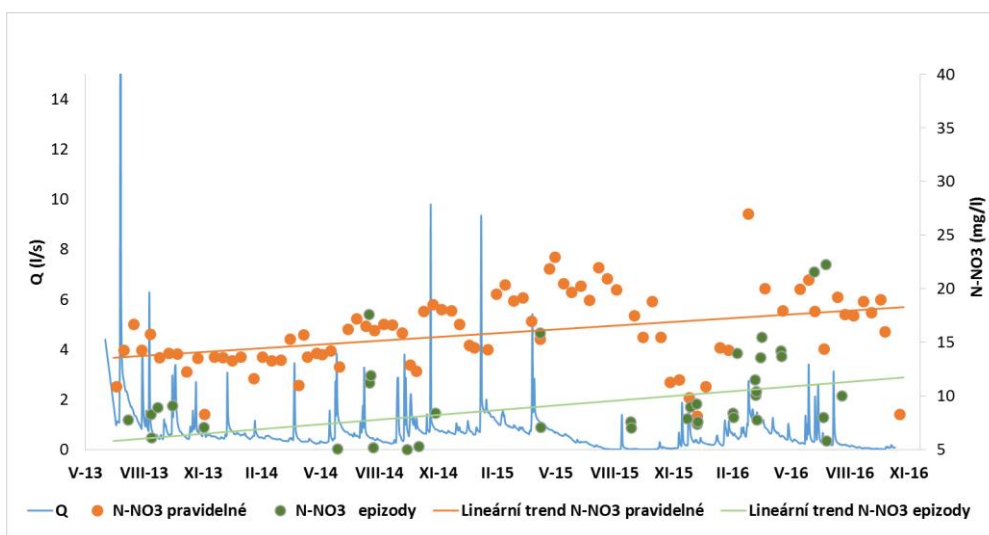
Obrázek 29. Koncentrace $N-NO_3$ v drenážních vodách pokusné lokality Vepříkov (drenážní skupina Vepř. 1)



Obrázek 30. Koncentrace $N-NO_3$ v drenážních vodách pokusné lokality Vepříkov (drenážní skupina Vepř. 2)



Obrázek 31. Vývoj koncentrací N-NO₃ v drenážních vodách Vepř. 1



Obrázek 32. Vývoj koncentrací N-NO₃ v drenážních vodách Vepř. 2

Odnos dusičnanového dusíku z povodí

Charakteristiky odnosu N-NO₃ jsou shrnuty v tab. 5. Odnos N-NO₃ se v jednotlivých letech sledování pohyboval od 8,3 do 21,9 kg N-NO₃/ha, a to především v závislosti na velikosti odtoku. Podíl vyplaveného N vůči aplikovanému N byl velmi variabilní a pohyboval se od 3 do 17 % bez závislosti na typu aplikovaného hnojiva.

Podíl SOE na celkovém odnosu N z povodí (tab. 6) je dán především vodností daného HR. V jednotlivých HR se podíl epizod na celkovém odnosu N pohyboval v rozmezí od 7 do 21 %, přičemž za celé sledované období byl na obou drenážních skupinách obdobný (17 % na Vepř. 1 a 18,4 % na Vepř. 2). Z 1 hektaru bylo v průběhu SOE vyplaveno 0,9 až 10,1 kg N/ha/rok. Podíly epizod na odnosu dusíku jsou na sledované lokalitě nižší než v případě fosforu, což je dáno převážným ředěním koncentrací N-NO₃ v jejich průběhu, což svědčí o relativně neprehnojené půdě.

Tabulka 5. Charakteristiky hnojení, odtoku a odnosu N-NO₃ z mikropovodí drenážních skupin Vepř. 1 a Vepř. 2.

** - měřeno od června 2013, miner – minerální hnojivo*

HR	2013*		2014		2015		2016	
Skupina	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2
miner	miner	fugát	miner	fugát	fugát	miner	fugát	miner
Aplikace celk. N (kg/ha)	187,5	202,5	148,5	360,0	171,5	104,6	261,0	185,5
Odtok (m ³ /ha)	859,0	744,0	869,0	768,0	965,0	685,0	416,0	502,0
Odnos N-NO ₃ (kg/ha/rok)	10,1	9,0	19,2	10,9	21,9	11,3	18,2	8,3
Celkový odnos N-NO ₃ (kg/rok)	201,5	254,3	383,0	307,9	436,9	319,2	363,1	234,5

Tabulka 6. Podíl srážko-odtokových epizod na odtoku a odnosu N-NO₃ z mikropovodí drenážních skupin Vepř. 1 a Vepř. 2

HR	2014		2015		2016		Celkem	
Skupina	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2	Vepř. 1	Vepř. 2
Způsob hnojení	min	fugát	fugát	min	fugát	min		
Počet epizod	16	19	8	11	13	25	37	55
Trvání epizod (dnů)	24,5	30,0	13,0	19,0	23,0	60,0	60,5	109,0
Podíl na odtoku (%)	19,9	29,6	19,7	18,2	14,5	39,4	18,5	23,1
Odnos v SOE (kg/ha)	3,3	2,3	4,0	0,9	2,8	2,4	10,1	5,6
Podíl na odnosu (%)	17,2	21,1	18,3	7,1	13,1	11,6	17,0	18,4

6. Doporučení pro praxi - závěr

Digestát a jeho složky separace jsou za předpokladu správného dávkování a způsobu aplikace kvalitními organickými hnojivy, která mohou zlepšovat půdní vlastnosti, zajišťovat přijatelné výnosy silážní kukuřice a rovněž snižovat riziko ztrát N vyplavením do podzemních vod ve srovnání s minerálními hnojivy. Jsou i přínosem pro ekonomiku zemědělského podniku, neboť nejenže snižují náklady na nákup základních živin v minerálních hnojivech, ale rovněž přinášejí i další méně často aplikované stopové prvky.

Užití digestátu v zemědělské praxi však často nezohledňuje všechny zásady, které vedou k jeho efektivnímu užívání. Při nesprávném nakládání (přehnojování) má digestát nepříznivé dopady na kvalitu půdy a vody, které vyvolávají negativní hodnocení účinků digestátu.

Při zohlednění výnosového potenciálu, obsahu půdního minerálního dusíku a maximálně možného odběru živin porostem (vč. meziplovin) v návaznosti na dynamiku uvolňování živin lze digestát a jeho složky separace bez rizik používat i na propustných půdách zranitelných oblastí dusičnany. S aplikací digestátu a fugátu na půdu je vzhledem k původu tohoto hnojiva (nízký obsah dostupné organické hmoty pro mikroorganismy po AF) potřebné zajišťovat přísun rozložitelné organické hmoty (např. slámou, mulčem meziplovin),

hnojem nebo kompostem), aby nedocházelo k jejímu nadměrnému rozkladu a snižování celkového obsahu v půdě a rovněž i k tvorbě dusičnanů v nežádoucím období.

Jednorázová aplikace digestátu a fugátu je vhodnou technologií pro hnojení kukuřice, zejména ve středně těžkých a těžších půdách. Digestát zajistí mírně nižší nicméně stabilnější výnosy (nižší propad během sucha). Efektivita využití N u fugátu ve vlhčích letech je však o 10-20 % vyšší (vyšší výnosy, nižší vyplavení N). Zvýšení výnosů však nedosahuje požadované úrovně (o cca 10 %, viz kap. V.), které by vyrovnalo náklady na separaci. Přídavek inhibitoru nitrifikace je za předpokladu dostatku vláhy vhodným opatřením pro zvýšení výnosu kukuřice a snížení vyplavení N do podzemních vod. V suchých letech je však riziko snížení výnosů.

Dělené dávky digestátu a fugátu jsou přijatelné ve srážkově normálním roce, kdy rovnoměrnější distribuce živin podle potřeb kukuřice a přiměřené srážky zajišťují lepší využití živin rostlinami a výnos ve srovnání s jednorázovými dávkami. Bez zapravení 2. dávky nejsou výnosy zvýšeny v takové míře, aby byla ekonomicky opodstatněna dvojí aplikace hnojiv. Pozitivním efektem dělení dávek však je nižší vyplavení N do podzemních vod během vegetační sezóny ve srovnání s jednorázovými dávkami. Rizika aplikace dělených dávek digestátu a fugátu jsou spojena s extrémními průběhy srážek. V případě vysokých srážek dělené dávky hnojiv nejsou účinné pro snížení rizika vyplavení dusičnanů do podzemních vod; v případě sucha nemusí být N z druhé dělené dávky dostupný pro rostliny v rozhodujícím období růstu. Zbytkové obsahy minerálního N v půdě v případě sucha dále mohou být příčinou vyššího vyplavování dusičnanů do podzemních vod poté, kdy v následujících obdobích přijdou srážky. Z tohoto pohledu se neseparované digestáty v podmínkách sucha ukazují jako výhodnější hnojivo než fugáty.

Aplikace separátu s přihnojením minerálními hnojivy je vhodnou kombinací pro zajištění obdobných, příp. i vyšších výnosů silážní kukuřice (v suchém roce) ve srovnání s minerálními hnojivy. Jeho aplikace přináší další výhody

z hlediska zvýšení obsahu přístupného fosforu, hořčíku, organické hmoty, vodoretenční půdní kapacity a zlepšení půdní struktury. Z tohoto hlediska se separace složek jeví jako vhodné opatření přispívající k péči o půdu. Je tím zvýšena opodstatněnost nákladů souvisejících se separací složek. Využití N ze separátu v daném roce je však nízké (max. 30 %) a postupnou mineralizací je zpřístupňován i v následujících obdobích, kdy by měl být zajištěn jeho odběr meziplošinami či ozimými plodinami. Jinak se zvyšuje riziko vyplavení dusičnanů do vod. Samotná aplikace separátu nezajistí požadované výnosy.

Reziduální obsahy minerálního N v půdě v případě sucha jsou zvýšené a mohou být příčinou vyššího vyplavování dusičnanů do podzemních vod poté, kdy v následujícím období přijdou srážky. Analýza obsahu minerálního dusíku pro účely stanovení optimální dávky digestátu a jeho složek separace je opodstatněná zejména po předchozí suché vegetační sezóně.

Z hlediska praxe je vhodnější aplikace digestátů, pokud je půda již dostatečně suchá, na jaře před setím kukuřice s následným zapravením. V takovém případě se riziko ztrát dusíku po aplikaci digestátu vyplavením jeví nižší než u půd hnojených minerálními hnojivy. Na základě využitelnosti N předpokládané podle NS pro fugát a digestát (60 %) lze maximální limity hnojení dusíkem zvýšit o 67 %, což v případě výnosové hladiny 2 (polní pokus Lukavec) představuje pro silážní kukuřici 367 kg celkového N. Případné užití této dávky je třeba vždy uvážit ve vztahu k výnosovému potenciálu pozemku a také zohlednit všechny dostupné zdroje dusíku v půdě před aplikací hnojiva. Existuje riziko, že nevyužitý N z této dávky by mohl představovat významnou zátěž podzemních vod dusičnany.

Využitelnost N u fugátu v srážkově optimálním roce byla v testovaných podmínkách propustné půdy vyšší (80 %) než je uvedeno v akčním programu NS (60 %). To znamená, že při užití fugátu je možné uvážit snížení celkové dávky N ve srovnání s digestátem bez negativního dopadu na výnos. Zejména v suchých letech by se toto opatření mělo pozitivně projevit na snížení obsahu půdního reziduálního minerálního dusíku.

Část dusíku je u fugátu, digestátu i separátu pro porost využitelná i v následující vegetační sezóně (odhadem 10-30 %). Při stanovení celkové dávky N je nutné uvážit nejen využitelnost N, ale i obsah minerálního N v půdě (zejména po předchozím suchém roce).

Z hlediska výživy rostlin dalšími živinami jako je fosfor, draslík, hořčík nebo mikroelementy je digestát vhodnější než fugát, který dodává především rychle dostupný dusík. Dávky hnojení digestátem je třeba adekvátně upravit, zvláště pokud jde o P, kde se po aplikaci digestátu během zimy může zvýšit riziko vyplavení P do podzemních vod.

Vyplavení dusičnanů po aplikaci fugátu do drenážních vod nepředstavuje zvýšené riziko z hlediska koncentrací a odnosu drenážním odtokem ve srovnání s minerálními hnojivy. Přesto, že bylo aplikováno vyšší celkové množství N ve fugátu na hektar než v minerálním hnojení, nedošlo vzhledem k jeho nižší využitelnosti a zároveň vyššímu čerpání pro tvorbu výnosu k ohrožení vod zvýšeným vyplavováním dusíku.

7. Summary

The methodological approach for efficient treatment with the digestate originated from agricultural biogas plants

The certified methodology presents verified agro-technical practices for efficient nutrients (especially nitrogen) utilization from digestate and fractions of solid-liquid separation, which ensure acceptable crop yields and reduce nitrogen losses into ground waters. The methodology is focused on maize growing on permeable soils in nitrate vulnerable zones. Provided that digestate and its solid-liquid fractions are used properly, they can be considered as suitable organic fertilizers replacing commercial fertilizers and, compared to them, improving soil properties and water protection. The application of liquid digestate or solid digestate combined with commercial fertilizers produces nearly the same maize yields when compared to

commercial fertilizers. Soils amended with the unseparated digestate can decrease maize yields of about 5-10 % compared to mineral-fertilized soils.

Unseparated digestate and liquid digestate applied in a single dose prior to maize sowing with the immediate soil incorporation is generally suitable technology of nutrient supply (minimal NH_3 volatilization, soil compaction and costs of applying). Dividing total application into two treatments (before sowing and at the beginning of the decisive growth stage) does not enhance maize yields substantially, even under normal rainfall conditions, but mitigates the loss of nitrogen into ground waters. However, during the dry season plants are not able to use nitrogen applied in the second dose and yields decrease in comparison with a single rate. As a result, the soil residual nitrogen remains in soil profile in large quantities to increase the risk of nitrogen leaching. This should be mitigated with subsequent intercropping establishment and reducing the application rate of nitrogen.

III. Srovnání novosti postupů

Dosud je s digestátem a jeho složkami nakládáno spíše ad hoc, tedy ke zvyšování půdní zásoby N a organické hmoty, nikoliv jako cíleného hnojení plodin. Tato metodika uvádí nové systematické postupy využití digestátu a jeho složek separace při pěstování kukuřice jako zásadní suroviny pro velkou část bioplynových stanic a pro živočišnou výrobu. Novost postupů lze spatřovat zejména v jejich komplexnosti pro efektivní nakládání nejen z hlediska ekonomických požadavků zemědělského podniku (optimalizace výnosů), ale i z hlediska požadavků ochrany přírody (redukce ztrát dusíku do prostředí plynnými emisemi a vyplavením do vod). Využitím digestátu jako takového je možné při jeho cílené aplikaci, omezení volatilizace a vyplavení živin do podzemních vod ušetřit ročně například 0,5 t ledku amonného na hektar (při minimální aplikaci 150 kg N/ha). Při jednotkové produkci 22 tun digestátu (což znamená 110 kg N) na instalovanou kW_{el} a rok, dochází

k úspoře 2000 Kč na instalovanou kW_{el.} v BPS a rok. Standardní produkci digestátu na zemědělské bioplynové stanici o instalovaném výkonu 1 MW_{el.} lze při plném provozu vyčíslit na 22 000 tun ročně (vstupy 20 % hnoje, 80 % kukuřičné siláže). Při využití hnojivého potenciálu to představuje pro zemědělský podnik úspory 2 mil. Kč ročně. Vše počítáno při ceně 5600 Kč/t ledku amonného. Podobně vychází úspora i vůči dalším minerálním hnojivům.

Z níže uvedené tab. 7 vyplývá, že produkce digestátu zatěžuje životní prostředí méně než produkce minerálních hnojiv, neboť hodnoty v jednotlivých kategoriích dopadu (řádky tabulky) pro minerální hnojiva jsou výrazně vyšší ve srovnání s produkcí digestátu.

Tabulka 7. Vliv výroby minerálních hnojiv a digestátu na životní prostředí charakterizované kategoriemi dopadu

Kategorie dopadu	Jednotka	Dusičnan amonný (jako čistý N)	Dusičnan vápenatý (jako čistý N)	Nitrátové hnojivo (jako čistý N)	Dusičnan draselný (jako K ₂ O)	Močovina (jako čistý N)	Digestát (jako čistý N)
Úbytek nerostných surovin	kg Sb eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Úbytek fosilních surovin	MJ	58,05	118,62	72,53	16,61	57,52	0,70
Globální oteplování	kg CO₂ eq	9,17	22,12	12,59	2,67	3,43	0,07
Poškozování ozónové vrstvy	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Humánní toxicita	kg 1,4-DB eq	1,37	5,16	2,67	0,53	0,96	0,02
Sladkovodní ekotoxicita	kg 1,4-DB eq	0,91	3,68	2,99	0,37	0,61	0,41
Mořská ekotoxicita	kg 1,4-DB eq	3024,00	11861,55	6370,00	1176,00	2196,00	51,36
Suchozemská ekotoxicita	kg 1,4-DB eq	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,03
Tvorba fotooxidantů	kg C ₂ H ₄ eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acidifikace	kg SO ₂ eq	0,04	0,06	0,06	0,01	0,03	0,00
Eutrofizace	kg PO ₄ --- eq	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00

Uvažujeme-li tak například náhradu dusičnanu/ledku amonného digestátem, při průměrné spotřebě 150 kg čistého dusíku na 1 ha zemědělské půdy za rok dojde k úspoře téměř 1,4 t emisí CO₂ z 1 ha intenzivně obhospodařované zemědělské půdy za sezónu (viz kategorie dopadu Globální oteplování). V případě dusičnanu vápenatého je to 3,3 t a v případě průměrného dusičnanového hnojiva 1,9 t emisí CO₂.

Bilance vlivů produkce digestátu (vyjádřeného jako čistý N) byla zpracována na základě předpokladů a alokace databázového procesu pro kogenerativní výrobu elektřiny a tepla v zemědělské BPS. Účelem BPS je totiž, alespoň z ekonomického hlediska, produkce elektrické a tepelné energie, zatímco digestát je zcela marginální (ekonomicky). Na základě odborného odhadu byl podíl digestátu na ekonomické bilanci BPS modelován v rozsahu 1 %. Na tuto hodnotu byly redukovány vlivy související s výrobou 1 kWh elektrické energie, ke které byla vztažena hodnota obsahu čistého N v digestátu (na výrobu 1 kWh elektrické energie připadá v modelu 0,0068 t digestátu s obsahem 0,59 % čistého N). Výsledek byl následně přepočten na obsah 1 kg čistého N. Je třeba podotknout, že se jedná o čistě modelový výpočet vytvořený na základě dostupných dat.

IV. Popis uplatnění certifikované metodiky

Certifikovaná metodika bude sloužit jako návod pro efektivní nakládání s digestátem a jeho složkami separace v rámci zemědělských podniků, které provozují bioplynové stanice a nakládání s digestátem je pro ně nezbytnou nutností. V dnešní době, kdy existují protichůdné názory o působení digestátu na půdní vlastnosti, resp. kvalitu podzemních vod, bude tato metodika založená na několikaletých výsledcích výzkumné činnosti přínosem pro zemědělskou i pro odbornou veřejnost. Metodika bude uplatněna Českou bioplynovou asociací z.s., která bude tuto metodiku distribuovat mezi provozovatele zemědělských bioplynových stanic v rámci své poradenské činnosti (<http://www.czba.cz/>).

V. Ekonomické aspekty

Ekonomická kalkulace výhodnosti separace pevných složek

Při posuzování výhodnosti separace digestátu je možné stanovit jako výchozí variantu hnojení neupraveným digestátem při standardním uložení 180 dnů, rozvozu a aplikaci traktorovou soupravou a na větší vzdálenost kombinace s kamionovou cisternou. Tato varianta byla porovnána s náklady na separaci, manipulaci a aplikaci digestátu, který byl separován na separát a fugát. Je třeba si uvědomit, že celková hmotnost materiálu se v tomto případě nesníží.

Ekonomická bilance byla provedena pro bioplynovou stanici o instalovaném výkonu 1 000 kW_{el}. Celkové náklady pro rozvoz neupraveného digestátu traktorem a kejdovačem do 1 km dosahovaly 1 077 530 Kč/rok. Provozní náklady na separaci, manipulaci, nakládku a aplikaci separátu dosahovaly 326 695 Kč/rok. Náklady na aplikaci fugátu pak činily 874 534 Kč/rok. Do bilance je však třeba započítat také investiční náklady na separátor a sklad separátu, které dosahovaly 300 000 Kč/rok. Celkové náklady na aplikaci digestátu po separaci činily 1 501 229 Kč/rok. Tato varianta tedy byla o 423 698 Kč/rok dražší než varianta výchozí.

Zde se započítávají náklady na separaci, manipulaci, nakládku a aplikaci separátu, dále náklady na aplikaci fugátu, ale také investiční náklady na separátor a sklad separátu. Celkové náklady na aplikaci digestátu po separaci jsou v konečném důsledku o 40 % vyšší oproti základní variantě. Z ekonomického zhodnocení separace digestátu vyplynulo, že separace digestátu je finančně dosti náročná, jak z pohledu provozních, tak z pohledu investičních nákladů. Bod zlomu, kdy aplikace separovaného fugátu a separátu začíná být bezztrátová, je dosažen jen v případě, kdy vhodná agrotechnická aplikace zajistí minimálně nárůst produkce kukuřice o 9-11 %, přičemž tento minimální nárůst je závislý především na aktuální výsledné hodnotě sklizené kukuřice (nákladová cena na tunu).

Tento minimální nárůst byl stanoven na základě výpočtu nákladových cen a potenciálních tržeb z produkované kukuřice při modelové valorizaci kukuřičné siláže v bioplynové stanici. Byly zvoleny následující podmínky: 35 % obsah sušiny a 4 % obsah popela v sušině, výhřevnost bioplynu 3 757 MJ/t, účinnost kogenerační jednotky 40 % a pevná výkupní cena elektřiny ve výši 4 120 Kč/MWh. Tržby z kukuřičné siláže zhodnocené prostřednictvím BPS dosáhly 4 914 Kč/t suché hmoty. Zisk byl odhadnut na 15 % z tržeb, tedy 737 Kč/t suché hmoty. Na základě těchto předpokladů bylo vypočítáno, že separace digestátu musí přinést minimálně 8,3 % vstupní siláže, což odpovídá nárůstu produkce o 9,1%.

Na základě polních pokusů v Lukavci, které proběhly v letech 2013, 2014 a 2016, bylo zjištěno, že digestát výrazně zvyšuje výnos, a to v průměru o 20 % v porovnání s nehnojenou půdou. Aplikace fugátu zvýšila výnos v průměru o 7 % v porovnání s aplikací digestátu. Samotná aplikace separátu naopak výnos kukuřice o 10-20 % snižovala ve srovnání s digestátem. Je zřejmé, že z hlediska zvýšení výnosů není aplikace separovaných složek opodstatněná.

VI. Seznam použité související literatury

Albuquerque, J.A., de la Fuente, C., Campoy, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán, A., Cegarra, J., Bernal, M.P. 2012. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *Eur J Agron* 43:119–128. doi:10.1016/j.eja.2012.06.001.

Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. 2006. Influence of different methods of covering slurry stores on greenhouse gas and ammonia emissions. *Int Congr Ser* 1293:315–318.

Bachmann, S., Gropp, M., Eichler-Löberman, B. 2014. Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3 year field experiment amended with digested dairy slurry. *Biomass Bioenergy*. doi:10.1016/j.biombioe.2014.08.004.

Battini, F., Agostini, A., Boulamanti, A.K., Giuntoli, J., Amaducci, S. 2014. Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: case study of a dairy farm in the Po Valley. *Sci Total Environ* 481:196–208. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.038.

Beauchemin, S., Simard, R.R., Cluis, D. 1998. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.* 27, 721–728.

Bonetta, S., Bonetta, S., Ferretti, E., Fezia, G., Gilli, G., Carraro, E. 2014. Agricultural Reuse of the Digestate from Anaerobic Co-Digestion of Organic Waste: Microbiological Contamination, Metal Hazards and Fertilizing Performance. *Water Air Soil Pollut* 225:2046, DOI 10.1007/s11270-014-2046-2

Börjesson, P., Berglund, M. 2007. Environmental systems analysis of biogas systems, part II: The environmental impact of replacing various reference systems. *Biomass and Bioenergy* 31:326–44.

doi:10.1016/j.biombioe.2007.01.004.

Eickenscheidt, T., Freibauer, A., Heinichen, J., Augustin, J., Drösler, M. 2014. Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions from high organic carbon grasslands. *Biogeosci Discuss* 11:5765–5809. doi:10.5194/bgd-11-5765-2014.

Erhart, E., Siegl, Th., Bonell, M., Unterfrauner, H., Peticzka, R., Ableidinger, Chr., Haas, D., Hartl, W. 2014. Fertilization with liquid digestate in organic farming—effects on humusbalance, soil potassium contents and soil physical properties. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* 16:4419.

Fouda, S. 2011. Nitrogen availability of biogas residues. PhD Technische Universität München.

Gericke, D, Bornemann, L, Kage, H, Pacholski, A. 2012. Modelling ammonia losses after field application of biogas slurry in energy crop rotations. *Water Air Soil Pollut* 223:29–47. doi:10.1007/s11270-011-0835-4.

Gómez-Brandón, M., Fernández-Delgado Juárez, M., Zangerle, M., Insam H. 2016. Effects of digestate on soil chemical and microbiological properties: A comparative study with compost and vermicompost. *Journal of Hazardous Materials* 302: 267-274.

Hansen, M.N., Henriksen, K., Sommer, S.G. 2006. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering. *Atmos Environ* 40:4172–4181. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.02.013.

Herrmann, A. 2013. Biogas production from maize: Current state, challenges and Prospects. 2. Agronomic and Environmental Aspects. *Bionerg. Res.*, 6:372 – 387.

Chantigny, M.H., Rochette, P., Angers, D.A., Bittman, S., Buckley, K., Massé, D., Belanger, G., Eriksen-Hamel, N., Gasser, M.O. 2010. Soil nitrous oxide

emissions following band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. *J Environ Qual* 39:1545–1553. doi:10.2134/jeq2009.0482.

Chiyoka W.L., Zvomuya, F., Hao, X. 2014. Changes in nitrogen availability in chernozemic soils amended with anaerobically digested cattle manure. *Soil Sci Soc Am J*, 78:843-851.

Insam, H., Gómez-Brandón, M., Ascher, J. 2015. Manure-base biogas fermentation residues – Friend or foe of soil fertility ? *Soil Biology & Biochemistry*, 84: 1-14.

Klír, J., Kuncová, E., Čermák, P. 2008. Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení. Metodika pro praxi. 2. aktualizované vydání. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

Klír, J., Kozlovská, L., Haberle, J., Mühlbachová, G. Metodický návod pro hospodaření ve zranitelných oblastech (4. akční program nitrátové směrnice 2016–2020)

Lijó L., González-García S., Bacenetti J., Negri M., Fiala M., Feijoo G., Teresa Moreira M. 2015. Environmental assessment of farm-scaled anaerobic co-digestion for bioenergy production. *Waste Management*, 41: 50–59.

Loria, E. R., J. E. Sawyer, D. W. Barker, J. P. Lundvall, and J. C. Lorimor. 2007. Use of anaerobically digested swine manure as a nitrogen source in corn production. *Agronomy Journal* 99:1119–29. doi:10.2134/agronj2006.0251.

Makádi, M., Szegi, T., Tomócsik, A., Orosz, V., Michéli, E., Ferenczy, A., Posta, K., Biró, B. 2016. Impact of Digestate Application on Chemical and Microbiological Properties of Two Different Textured Soils. *Communications in soil science and plant analysis* 47 (2): 167–178. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2015.1109652>

- Marcato, C.-E., Mohtar, R., Revel, J.-C., Pouech, P., Hafidi, M., Guiresse, M. 2009. Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. *Int Biodeterior Biodegrad* 63:260–266. doi:10.1016/j.ibiod.2008.10.001.
- Matula, J. 2007. Optimalizace výživného stavu půd pomocí diagnostiky KVK-UF. In: *Metodika pro praxi, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.*: 47 str.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M, Astals, S. 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renew Sust Energ Rev*, 36:412–427.
- Möller, K. 2009. Effects of biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. *Nutr Cycl Agroecosyst* 84:179–202. doi:10.1007/s10705-008-9236-5.
- Möller, K., Stinner, W. 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *Eur J Agron* 30: 1–16. doi:10.1016/j.eja.2008.06.003.
- Möller, K., Schulz, R., Müller, T. 2011. Effects of setup of centralized biogas plants on crop acreage and balances of nutrients and soil humus. *Nutr Cycl Agroecosyst* 89:303–312. doi:10.1007/s10705-010-9395-z.
- Möller, K., Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng Life Sci*, 12:242 – 257.
- Möller, K., Schultheiss, U. 2014. Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau. *KTBL Schrift 499*, Darmstadt/Germany, p 392.
- Möller, K. 2015. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35: 1021- 1041
- Monlau, F., Francavilla, M., Sambusiti, C., Antoniou, N., Solhy, A., Libutti, A., Zabaniotou, A., Barakat, A., Monteleone, M.. 2016. Toward a functional integration of anaerobic digestion and pyrolysis for a sustainable resource

management. Comparison between solid-digestate and its derived pyrochar as soil amendment *Applied Energy* 169: 652–662.

Nadeem, S., Hansen, S., Azzaroli Bleken, M., Dörsch, P. 2012. N₂O emission from organic barley cultivation as affected by green manure management. *Biogeosciences* 9:2747–2759. doi:10.5194/bg-9-2747- 2012.

Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron Sustain Dev*, 34:473-492.

Pabón-Pereira, C.P., de Vries, J.W., Slingerland, M.A., Zeeman, G., van Lier, J.B. 2014. Impact of crop–manure ratios on energy production and fertilizing characteristics of liquid and solid digestate during codigestion. *Environmental Technology*, DOI: 10.1080/09593330.2014.908242

Petersen, J., Sørensen, P. 2008. Loss of nitrogen and carbon during storage of the fibrous fraction of separated pig slurry and influence on nitrogen availability. *J Agric Sci (Camb)* 146:403–413.

Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., Tambone, F., D'Imporzano, G., Adani, F. 2016. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts.

Severin, M., Fuss, R., Well, R., Hähndel, R., Van den Weghe, H. 2015a. Greenhouse gas emissions after application of digestate: short-term effects of nitrification inhibitor and application technique effects. *Archives of Agronomy and Soil Science*.

Severin, M., Fuss, R., Well, R., Garlipp, F., Van den Weghe, H. 2015b. Soil, slurry and application effects on greenhouse gas emissions. *Plant Soil Environ*, 61 (8): 344-351. DOI: 10.17221/21/2015-PSE.

Schauss, K. 2006. Impact of fermented organic fertilizers on in-situ trace gas fluxes and on soil bacterial denitrifying communities in organic agriculture.

PhD thesis, Universität Gießen, available at: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2007/3894/pdf/SchaussKristina-2006-10-26.pdf>

Sommer, S.G., Hutchings, N.J. 2001. Ammonia emissions from field applied manure and its reduction - invited paper. *Eur J Agron* 15:1–15. doi:10.1016/S1161-0301(01)00112-5.

Svoboda, N., Taube, F., Kluß, Ch., Wienforth, B., Sieling, K., Hasler, M., Kage, H., Ohl, S. Hartung, E., Herrmann, A. 2015. Ecological Efficiency of Maize-Based Cropping Systems for Biogas Production. *Bioenerg. Res.* 8:1621–1635. DOI 10.1007/s12155-015-9614-1

Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, Ch., Kage, H., Hermann, A. 2013. Nitrogen leaching losses after biomass residue application to maize. *Soil Till Res*, 130:69-80.

Šimon, T., Kunzová, E., Friedlová, M. 2015. The effect of digestate, cattle slurry and mineral fertilization on the winter wheat yield and soil quality parameters. *Plant Soil environ* 61 (11): 522-527.

Tambone, F., Adani, F., Gigliotti, G., Volpe, D., Fabbri, C., Provenzano, M.R. 2013. Organic matter characterization during the anaerobic digestion of different biomasses by means of CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. *Biomass Bioenergy* 48:111–120. doi:10.1016/j.biombioe. 2012.11.006

Tambone, F., Genevini, P., D'Imporzano, G., Adani, F. 2009. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresour Technol* 100:3140–3142. doi:10.1016/j.biortech.2009.02.012

Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T. 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biol Biochem* 58:82–87. doi:10.1016/j.soilbio.2012.11.006.

- Walsh, J.J., Jones, D.L., Edwards-Jones, G., Williams, A.P. 2012. Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost. *J. Plant Nutr Soil Sci*, 175:840-845.
- Wang, Y., Dong, H., Zhu, Z., Liu, C., Xin, H. 2014. Comparison of air emissions from raw liquid pig manure and biogas digester effluent storages. *Trans ASABE* 5:635–645. doi:10.13031/trans.57.10292.
- Weiland, P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbial Biotechnol*, 85:849-860.
- Wolf, U., Fuss, R., Höppner, F., Flessa, H. 2014. Contribution of N_2O and NH_3 to total greenhouse gas emission from fertilization: results from a sandy soil fertilized with nitrate and biogas digestate with and without nitrification inhibitor. *Nutr Cycl Agroecosyst* 100: 121-134.

VII. Seznam předcházejících publikací autorů

Duffková, R., Mühlbachová, G. 2015. Vliv aplikace digestátu na produkci kukuřice. *Energie* 21 8(2): 22-24. ISSN 1803-0394.

Duffková, R., Zajíček, A., Fučík, P. 2014. Vyplavení dusíku a fosforu z malých zemědělských odvodněných povodí s aplikací různých hnojiv. *Vodní hospodářství* 64(12): 47-52.

Duffková, R., Macurová, H. 2010. Jak zlepšit využití živin z kejdy aplikované na travní porosty, *Úroda*, 2010, roč. 58, č. 8: 57-59.

Duffková, R., Macurová, H. 2010. Vliv kejdivání travního porostu na obsah minerálního dusíku, *Úroda*, roč. 58, č. 11: 34-37.

Duffková, R., Zajíček, A. 2011. Hodnocení kvality podzemní vody po kejdivání a mulčování trvalého travního porostu. *Vodní hospodářství*, 61 (7): 34 – 37.

Fučík, P., Zajíček, A., Duffková, R. 2015. Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic — Options for Its Improvement. In *Research and Practices in Water Quality* Teang Shui Lee (ed.): 239-262. InTech. Kapitola v knize. ISBN 978-953-51-2163-3. <http://dx.doi.org/10.5772/59298>

Mühlbachová, G., Duffková, R., Kusá, H., Vavera, R., Káš, M., Zajíček, A. 2016. Hnojení kukuřice digestátem a fugátem z bioplynových stanic. *Úroda* 11/2016: 16 – 20.

Zajíček, A., Kvítek, T., Duffková, R., Tachecí, P. 2013. Vliv využití půdy ve zdrojové oblasti na velikost drenážního odtoku. *Vodní hospodářství*, 63(8): 274-278.

Zajíček, A., Duffková, R., Fučík, P. 2014. Odnosy dusíku a fosforu z malých zemědělských odvodněných povodí po aplikaci různých typů hnojiv. *Hydrologie malého povodí 2014. ÚH AV ČR, ČHMÚ. Sborník: 576-583.*

Seznam použitých zkratk

AF	anaerobní fermentace
ANR (%)	využitelnost aplikovaného N pro tvorbu výnosu (z ang. Apparent nitrogen recovery)
AP	aplikační pásmo
BPEJ	bonitovaná půdně ekologická jednotka
BPS	bioplynová stanice
C:N	poměr obsahu uhlíku a dusíku v hnojivu
Cfw	průtokově vážená koncentrace
DZES	dobry zemědělský a environmentální stav půdy
EHS	Evropské hospodářské společenství
HR	hydrologický rok
KVK-UF	půdní test založený na extrakci octanem amonným
MEO	mírně erozně ohrožený
MWD	průměrná hodnota velikosti rozrušeného agregátu, z ang. mean weighted diameter (prostý vážený průměr)
MZe	Ministerstvo zemědělství
NO _x	suma oxidů dusíku
NS	nitrátová směrnice
PPH	povinné požadavky hospodaření
PRV	program rozvoje venkova
RHH	relativní hnojivá hodnota
SEO	silně erozně ohrožený
SOE	srážko-odtoková epizoda
VH	výnosová hladina
ZOD	zranitelná oblast dusičnany

Certifikační doložka

Dedikace

Metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR a jako plánovaný výstup projektu č. TA03020202 „Optimalizace použití digestátu na zemědělskou půdu ve vztahu k efektivnímu využití živin a ochraně půdy a vody“.

Jména oponentů

Odborník ze státní správy:

Ing. Michaela Budňáková
Ministerstvo zemědělství ČR
(Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1, oddělení
polních plodin, ministerský rada, tel.: +420 221 812 071,
michaela.budnakova@mze.cz)



Odborník z daného oboru:

Mgr. Ing. Lukáš Páček, Ph.D.
Česká zemědělská univerzita v Praze
(Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 – Suchbát, fakulta
agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, projektové a inovační
centrum FAPPZ, pacek@af.czu.cz, tel.: +420 224 382 577)



Kontakty na předkladatele metodiky

Ing. Renata Duffková, Ph.D.

Oddělení Hydrologie a ochrany vod

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5-Zbraslav

tel.: +420 257 027 279

mobil: +420 724 214 162

duffkova.renata@vumop.cz

www.vumop.cz



Ing. Gabriela Mühlbachová, Ph.D.

Tým Integrovaná výživa rostlin

Odbor systémů hospodaření na půdě

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.

Drnovská 507/73

161 06 Praha 6 – Ruzyně

tel.: +420 233 022 205

mobil: +420 702 087 748

muhlbachova@vurv.cz

www.vurv.cz



Ing. Jan Matějka

ECO trend Research centre s.r.o.

Na Dolinách 128/36

147 00 Praha 4

tel.: +420 267 912 338

jan.matejka@ecotrend.cz

<http://www.ecotrend.cz>



Prohlášení předkladatele metodiky

Předkladatel metodiky prohlašuje, že zpracovaná metodika nezasahuje do práv jiných osob z průmyslového nebo jiného duševního vlastnictví.

Předkladatel metodiky souhlasí s uveřejněním metodiky na webových stránkách Ministerstva zemědělství.

Název	Metodický postup pro efektivní užití digestátu ze zemědělských bioplynových stanic
Autoři	Ing. Renata Duffková, Ph.D., Ing. Gabriela Mühlbachová, Ph.D., Ing. Jan Matějka, Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D., Ing. Helena Kusá, Ph.D., Ing. Petr Fučík, Ph.D., Ing. Martin Káš, Ing. Luboš Nobilis, Ing. Pavel Bartoš, Ing. Bohuslav Fendrych
Vydal	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
Vydání	První vydání, 2016
Počet stran	84
Náklad	200 ks
Tisk	Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6
ISBN	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., ISBN 978-80-87361-62-7, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., ISBN 978-80-7427-227-1