

Torefikovaná sláma a seno jako upravená organická hmota a půdní aditivum

certifikovaná metodika

Pavel Tlustoš a kol.



© Česká zemědělská univerzita v Praze
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ
165 00 Praha-Suchbátol
<http://www.af.czu.cz>

Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze

ISBN 978-80-213-2957-7

Praha 2019

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu
Torifikace: CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004771

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Torefikovaná sláma a seno jako upravená organická hmota a půdní aditivum

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Pavel Tlustoš a kol.

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu

Torifikce: CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004771, Torefikovaná sláma a seno jako upravená organická hmota a půdní aditivum.

Hlavním cílem projektu bylo vybudovat provozní torefikační jednotku k úpravě organických materiálů, zejména slámy a sena.

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu **Torifikace:**
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004771.

Kolektiv autorů:

prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc.
Ing. Kateřina Pračke, Ph.D.
Ing. Lukáš Kaplan, Ph.D.
Ing. Filip Mercl
Ing. Jana Najmanová

Torefikovaná sláma a seno jako upravená organická hmota a půdní aditivum

Pavel Tlustoš a kol.

Vydání první, 2019

Vydavatelství: Česká zemědělská univerzita v Praze

Tisk Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha Suchdol, www.powerprint.cz

Obálka: Torefikovaná sláma a seno jako upravená organická hmota a půdní aditivum

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ ČZU v Praze

Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 - Suchdol

tel.: +420 224 382 736

<http://www.af.czu.cz>

ISBN 978-80-213-2957-7

I. Cíl metodiky

Problematika správné péče o půdu, obsah a aplikace organické hmoty jsou v souvislosti s péčí o půdní úrodnost, jejími fyzikálně-chemickými vlastnostmi a také se stávajícím suchým obdobím velmi diskutované téma. S ohledem na útlum živočišné produkce významně poklesl přísun stabilní organické hmoty do půdy, a proto se intenzivně hledají zdroje jak tento výpadek eliminovat. Stabilizovaná organická hmota aplikovaná nejčastěji ve formě vyzrálého hnoje nebo kvalitního kompostu se nedá nahradit zaorávkou zeleného hnojení ani posklizňových zbytků reprezentovaných nejčastěji slámou popřípadě i dalších organických materiálů. Jednou z možností jak tuto organickou hmotu stabilizovat je její pyrolýza. Hlavním produktem pyrolýzy jsou energeticky bohaté plyny a kapaliny, vedlejším pak stabilní biouhel (biochar). Jeho využití jako půdního aditiva je v posledním desetiletí v celém světě intenzivně zkoumáno. Hledají se způsoby jak tento materiál vhodně využít a tak celkově zefektivnit technologii pyrolýzy a jejího využití pro produkci obnovitelných zdrojů energie. Zejména vysoká energetická náročnost limituje rozšíření této technologie do praxe. Pyrolýza je obecně vysokoteplotní (500 – 800 °C) a tudíž energeticky náročný proces, proto se zejména pro přípravu pevné složky začíná testovat i nízkoteplotní pyrolýza (250 – 350 °C) tzv. torefakce. Se snižující se teplotou pyrolýzy se zvyšuje produkce pevné složky na úkor energetických složek, zcela však chybějí informace o jejím složení i chování v půdě. Koncepce energetického využívání obnovitelných zdrojů je jedním z prioritních cílů rozvoje naší ekonomiky, a proto se zde nabízí možnost využití jedné části podílu organické hmoty jako energie a druhé jako stabilizovaného organického materiálu zlepšujícího půdní vlastnosti. Vedle dlouhodobé sekvestrace atmosférického uhlíku se v případě vysokoteplotních biouhlů hovoří i o zlepšení využití živin rostlinami, o vyšší aktivitě půdních mikroorganismů i o zvýšení vodní retenční kapacity půd. Žádná z těchto vlastností nebyla dosud prezentována i u torefikovaných aditiv.

Cílem předkládané metodiky je poskytnout informace o základním složení a vlastnostech torefikované slámy a sena, o metodách vhodných k jejich stanovení, a o vlivu torefikované slámy a sena na růst rostlin a odběr živin během dvouletého pěstování kukuřice. Torefikované materiály jsou relativně chudé na dusík, proto bylo dalším cílem stanovit jejich význam při klasickém hnojení minerálními hnojivy a při hnojení alternativním hnojivem fugátem – vedlejším kapalným produktem z bioplynových stanic.

II. Vlastní popis metodiky

Předkládaná metodika je souhrnem vhodných finančně dostupných metod, které lze využít pro hodnocení fyzikálních a chemických vlastností torefikovaných materiálů, kde je důležité, kromě znalosti celkového obsahu prvků, znát i obsah přijatelných živin. S využitím těchto metod uvádí změny ve složení vstupních a torefikovaných materiálů a schopnost upravených materiálů zadržovat vodu. Na základě výsledků nádobových i polních pokusů ukazuje chování torefikovaných materiálů v půdě a jejich vliv na výnos a odběry živin kukuřicí a dává návod na jejich využití. V metodice jsou detailně popsány postupy, které byly použity při řešení výzkumného projektu OPPI, Torifikce: CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004771. Pro stanovení základních vlastností aditiv (obsahy prvků, obsahy přístupných prvků) jsou doporučeny vhodné metodické postupy.

1. Úvod

V posledním desetiletí se výzkum intenzivně věnuje využití vedlejšího produktu po pyrolýze organické hmoty tzv. biouhlí, z hlediska jeho možného uplatnění jako půdního aditiva. Biouhlí je jemnozrnná porézní, na uhlík bohatá substance podobající se dřevěnému uhlí (*charcoal* – odtud biouhlí). Získává se pyrolýzou rostlinné biomasy - termickým rozkladem, za různých teplot, bez přístupu médií obsahujících kyslík. V posledních letech se takto získaným materiálem autoři zabývají jako aditivem, zlepšujícím půdní vlastnosti. Bylo zjištěno, že biouhlí ovlivňuje půdní vlastnosti, jako pH, množství přijatelných forem prvků, obsah uhlíku (Amonette a Joseph, 2009). V důsledku neustálého zvyšování koncentrace CO₂ v atmosféře byla navržena teorie, že aplikací materiálu s vysokým obsahem uhlíku jakým biouhlí je, se část uhlíku bude dlouhodobě ukládat v půdě. Američtí vědci ve své studii vypočetli, že by bylo možné pyrolýzou biomasy, kde by se získával plyn a olej pro energetické účely a biouhlí by bylo aplikováno do půdy, dosáhnout sekvence uhlíku až do výše 10 % ročních emisí z fosilních paliv v USA (Lehmann, 2007).

Torefakce je termochemická metoda zpracování biomasy pro zlepšení jejich vlastností jako vstupu pro spalování či pyrolýzu. Jde zpravidla o pomalé zahřívání biomasy (< 50 °C/min; Bergman a Kiel, 2005) v inertní atmosféře do teploty cca 300 °C (Fonseca Felfli a kol, 1998; Fisher a kol, 2012). Jelikož torefakce probíhá za relativně nízkých teplot je konverze biomasy na energetické složky významně nižší a tím zůstává vyšší pevný podíl biouhlu. Jeho vlastnosti však v důsledku nízkoteplotní konverze nejsou pravděpodobně natolik odlišné od původního materiálu. Doposud není k dispozici literatura, kde by bylo popsáno, že se torefikovaná biomasa dále testuje pro její využití jako půdní aditivum.

Předmětem přehledu bude nacházet a porovnávat podobnosti a odlišnosti pyrolyzovaných materiálů na základě již publikovaných dat a navrhnout přístup k ověření torefikovaného materiálu coby půdního aditiva.

Biouhlí obecně je charakterizováno širokým spektrem vlastností, které se odvíjejí od typu vstupní suroviny a podmínek pyrolýzy (Antal a Groenli, 2003). Vstupní materiál je organického původu, často z dřevní štěpky, dále agronomického odpadu, slámy, včetně kukuřičné, trávy, hnoje, matoliny a podobně. Už z toho vyplývá, že vlastnosti biouhlí se pak liší. Podmínky pyrolýzy, především teplota a doba průběhu karbonizace také velmi ovlivňují výsledný produkt. Společnou vlastností pro biouhlí je, že se organický podíl vyznačuje vysokým obsahem uhlíku (Lehmann a Joseph, 2009). Všeobecně lze shrnout, že se jedná o neutrální až zásaditý materiál (Gaskin a kol., 2008), při čemž biouhlí připravené za nižších teplot (charakteristických pro torefakci) je charakterizováno obsahem uhlíku 40 – 65 % (Pach a kol., 2002; Arias a kol., 2008). Působení biouhlí v půdě je dáno jeho fyzikálně-chemickými vlastnostmi, jeho povrchem, prostorem pro půdní mikroedafon, obsahem živin, jeho schopností sorbovat živiny a následně je uvolňovat do půdního roztoku. Nejen vlastnosti biouhlí, ale také vlastnosti půdy, kam je biouhlí aplikováno podmiňují, jak efektivní bude aplikace tohoto materiálu (Lehmann a Joseph, 2009; Novak et al, 2016). Jedná se o velice porézní materiál a specifický povrch biouhlí je srovnatelný nebo vyšší než u půdních minerálů, a to především u materiálů připravených za vyšších teplot.

Molární poměr prvků u biouhlí je užitečná charakteristika pro odhad polarity materiálu a jeho možné interakce s vodou. Se vzrůstající teplotou pyrolýzy se zvyšuje obsah uhlíku, ovšem funkční skupiny (-OH, -COOH, -CHO, C=O) se během pyrolýzy uvolňují, tudíž polárnější materiál vzniká při nižších teplotách pyrolýzy (Novak a kol., 2009a). U biouhlí připraveného torefakcí (270 °C, 30 min. zdržení) byla pozorována ztráta – OH skupin a zvýšení skupin C=O (Ibrahim a kol., 2013).

Zásadním, z pohledu zemědělské produkce a ochrany životního prostředí, je vliv biouhlí na mobilitu a množství přístupných živin v půdě. Předpokládaným důvodem pozitivního vlivu na půdní ekosystém (rostlinný i mikrobiální) je právě přímý vliv živin obsažených v biouhlí nebo jeho schopnost živiny sorbovat a postupně uvolňovat (Mukherjee and Zimmerman, 2013). Díky jeho vlastnostem se předpokládá, že je schopen zabraňovat nadměrnému vyplavování a tedy i ztrátám živin. Otázkou je stále míra vlivu chemických a fyzikálních vlastností na sorpci jednotlivých živin. Předpokladem je, že výrazný efekt na vyplavování živin má, kromě aktivního povrchu a funkčních skupin na povrchu biouhlí (Chintala, a kol, 2012), i jeho vliv na pohyb půdní vody (Zheng a kol, 2016).

Kromě zmíněných vlivů může být biouhlí prospěšné i přímým uvolňováním živin, které samo obsahuje (Angst a Sohi, 2013; Mukherjee and Zimmerman, 2013). Obsah těchto živin je závislý na poměru živin ve vstupní biomase pro výrobu biouhlí

a podmínkách pyrolýzy. Bylo prokázáno, že se živiny z biouhlí uvolňují postupně a jsou dostupné rostlinám. Mezi jednotlivými živinami a materiály však existují velké rozdíly v míře uvolňování a dostupnosti pro rostliny (Angst a Sohi, 2013).

Jak již bylo uvedeno výše, primární myšlenkou aplikace biouhlí do půdy je sekvestrace uhlíku v půdě. Díky základním vlastnostem tohoto materiálu byl pozorován jeho pozitivní vliv na různé půdní funkce, či vlastnosti (Verheijen a kol., 2010). Bylo také zjištěno, že biouhlí je stabilní, díky jeho aromatickému uspořádání struktury, jenž umožňuje pomalý rozklad v půdě, protože mikroorganismy využívají tyto sloučeniny pouze s obtížemi (Rosa a kol, 2007).

Liard a kol. (2010) sledovali v inkubačním experimentu (promývací kolony) vliv biouhlí aplikovaného do hlinité půdy. Varianty s biouhlím se vyznačovaly vyšší schopností retence vody (potvrzuje na jílových půdách i Sun a Lu, 2014), zvýšil se specifický povrch půdy (potvrzuje i Chan a kol., 2007; Sun a Lu, 2014 v jílových půdách), až o 20 % se zvýšila kationtová výměnná kapacita a pH se zvýšilo až o jednotku (při nejvyšší dávce biouhlí, tj. 20 %). Zvýšil se obsah celkového dusíku, organického uhlíku, extrahovatelného P, K, Mg, Ca (Mehlich III). Zvýšení pH půdy s přísadkou biouhlí pozorovali i Lehmann (2007). Yuan a kol. (2011) připisují zvýšení pH půdy po aplikaci biouhlí zvýšenou retenci živin.

Aplikace biouhlí může zvýšit vodní retenční kapacitu půd. Dle Sun a Lu (2014) lze aplikací biouhlí zvýšit množství rostlinám dostupné vody v jílovitých půdách. Wang et al. (2019) uvádějí, že navýšení vodní retenční kapacity půd, stejně jako množství rostlinám dostupné vody, lze očekávat jen u půd s hrubou texturou, např. písčitých, a pouze po aplikaci biouhlí s vysokým objemem pórů. Navíc vliv takové aplikace je dle autorů pouze dočasný, jelikož v půdě dochází k vyplňování pórů biouhlí částicemi jílu a organickou hmotou. Mollinedo et al. (2015) uvádí, že aplikací 4 hm. % biouhlí do půdy lze v optimálním případě prodloužit dobu transpirace kukuřice nebo sóji v suchém období o 1,4 – 2,6 dne.

2. Analýza vstupních surovin a torefikovaných materiálů

První částí metodiky je charakteristika vstupních surovin, slámy ozimé pšenice a lučního sena před a po torefakci. Byl stanoven celkový obsah živin a přijatelný obsah živin ve výluhu Mehlich III.

2.1 Metodické postupy

Torefakce vstupních materiálů. Doba zdržení materiálu od vsádky až po vyjmutí bylo 190 minut. Teplota procesu byla 350 °C, při čemž maximální teplota ve středu vsázky byla stanovena na 354,9 °C. Provozní atmosféra byla inertní (CO₂) za přetlaku 0,2 kPa.

Metoda mikrovlnného rozkladu aditiv pro stanovení živin. Mikrovlnný rozklad byl proveden v kyvetách, do kterých bylo naváženo 0,5 g vzorku. Poté byly vzorky zality 8 ml HNO₃ a 2 ml H₂O₂, podrobeny mikrovlnnému rozkladu za zvýšené teploty a tlaku, a vzniklý mineralizát byl odpařen. Obsahy celkových živin byly stanoveny atomovou absorpční spektrometrií s plamenovou atomizací na přístroji Varian 280FS (Varian, Austrálie) a optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

Metoda mikrovlnného rozkladu půdy pro stanovení živin. U vzorků pěstebních směsí byl stanoven obsah celkových živin P, K, Ca, Mg. Příprava vzorků k analýzám prvků spočívala v navážce 0,5 g vzorku, poté zalitím 10 ml lučavkou královskou a podrobení mikrovlnnému rozkladu za zvýšené teploty a tlaku. Obsahy jednotlivých prvků byly stanoveny atomovou absorpční spektrometrií s plamenovou atomizací na přístroji Varian 280FS a optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji Varian Vista Pro, oba firma Varian, Austrálie.

Stanovení přijatelných forem prvků metodou podle Mehlicha III. Vzorek se extrahoval kyselým roztokem, který obsahuje fluorid amonný pro zvýšení rozpustnosti různých forem fosforu vázaných na hliník. Dusičnan amonný příznivě ovlivňuje desorpci draslíku, hořčíku a vápníku. Kyselá reakce roztoku je nastavena kyselinou dusičnou a octovou. Přítomnost EDTA zajišťuje dobrou uvolnitelnost významných mikroelementů. Navážka 5 g zeminy vzorku byla přelita ve třepací láhvi 50 ml extrakčního činidla, třepala se 10 minut. Suspenzi byla zfiltrována přes papírový filtr. Filtrát byl změřen na atomovém nebo emisním spektrometru.

Stanovení vodní retenční kapacity půd. Vzorky torefikovaných materiálů byly přidány do testovaných půd (Fluvizem a Černozem) v množství 5 a 10 hm. %. Směsi byly důkladně homogenizovány a umístěny do Mitscherlichových nádob. Následně byly směsi přesyceny vodou a při zamezení výparu umístěny tak, aby gravitační voda mohla z půdního sloupce volně odcházet. Po 16ti hodinách bylo gravimetricky stanoveno množství zadržené vody. Testování probíhalo vždy ve třech opakováních.

2.2 Zhodnocení vlastností vstupních surovin a torefikovaných materiálů surovin

Základní charakteristiky aditiv jsou uvedeny v tabulce 1, 2, 3, a 4.

Celkový obsah prvků v torefikovaných materiálech a původních materiálech ukazují tabulky 1 a 2. Torefakce vedla ke zvýšení celkového obsahu sledovaných prvků v seně i ve slámě. Torefikované seno se vyznačovalo vyššími hodnotami celkových obsahů sledovaných prvků ve srovnání s torefikovanou slámou u P, N, Fe, Mn, Zn a B. Výrazně se změnil obsah fosforu – zvýšení o 77% a draslíku – zvýšení o 70% u sena. U slámy byl zjištěn nárůst o 150% u fosforu a o 98% u draslíku. Obsah uhlíku byl u obou materiálů srovnatelný. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny u draslíku a železa.

Tabulky 3 a 4 ukazují hodnoty přijatelných forem prvků. Proces torefakce zvýšil obsah přijatelných forem fosforu a draslíku u slámy. Oba materiály mají nízké obsahy rizikových prvků Cd a Pb (tabulka 4a).

Tabulka 1. Celkový obsah základních živin a makroživin ve vstupních a v torefikovaných materiálech sena a slámy (%). Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Materiál		P	K	Ca	Mg	S	N	C	H
Vstupní	seno	0,13 ^b	1,40 ^b	0,36 ^c	0,12 ^b	0,13 ^b	1,12 ^b	41,8 ^b	5,82 ^a
	sláma	0,02 ^d	1,13 ^b	0,38 ^c	0,10 ^b	0,13 ^b	0,53 ^d	41,9 ^b	5,59 ^a
Torefikovaný	seno	0,23 ^a	2,39 ^a	0,56 ^b	0,19 ^a	0,16 ^a	1,62 ^a	57,4 ^a	5,06 ^b
	sláma	0,05 ^c	2,24 ^a	0,78 ^a	0,20 ^a	0,21 ^a	0,79 ^c	57,3 ^a	4,95 ^b

Tabulka 2. Celkový obsah mikroživin a rizikových prvků ve vstupních a v torefikovaných materiálech sena a slámy (mg/kg). Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Materiál		Fe	Mn	Cu	Zn	B	Ni	Cd	Pb	Cr
Vstupní	seno	284 ^b	141 ^b	4,3 ^b	42,3 ^a	3,39 ^b	1,64 ^b	0,23 ^a	<0,45 ^b	0,93 ^b
	sláma	66 ^c	17 ^d	1,9 ^c	12,7 ^b	0,68 ^c	0,47 ^c	0,09 ^b	<0,45 ^b	0,48 ^c
Torefikovaný	seno	400 ^a	222 ^a	7,3 ^a	44,6 ^a	5,76 ^a	2,81 ^a	0,39 ^a	1,09 ^a	1,35 ^a
	sláma	142 ^b	34 ^c	3,5 ^b	15,5 ^b	3,72 ^b	1,10 ^b	0,16 ^b	<0,45 ^b	1,83 ^a

Tabulka 3. Přístupný obsah makroživin ve vstupních surovinách a torefikovaných materiálech sena a slámy (mg/kg). Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Materiál		P	K	Ca	Mg	S
Vstupní	seno	1062 ^a	14621 ^b	2389 ^{ab}	1069 ^a	624 ^b
	sláma	192 ^c	11976 ^b	2589 ^{ab}	983 ^b	895 ^a
Torefikovaný	seno	588 ^b	13939 ^b	1912 ^b	678 ^c	507 ^b
	sláma	207 ^c	16254 ^a	2678 ^a	791 ^c	883 ^a

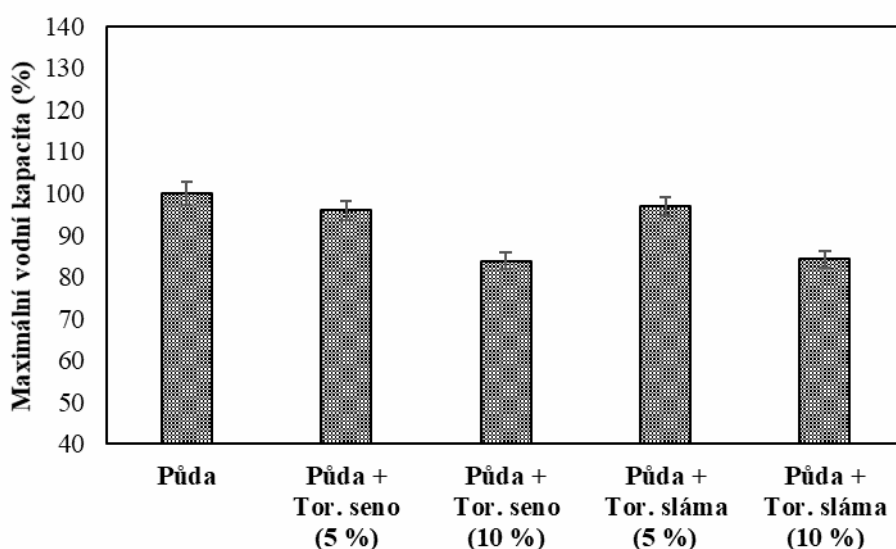
Tabulka 4. Přístupný obsah mikroživin a rizikových prvků ve vstupních surovinách a torefikovaných materiálech sena a slámy (mg/kg). Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Materiál		Fe	Mn	Cu	Zn	B	Ni	Cd	Pb	Cr
Vstupní	seno	26,1 ^a	2,9 ^a	3,03 ^a	23,5 ^a	<0,15	0,93 ^a	0,19 ^a	0,31 ^b	0,11 ^{ab}
	sláma	13,3 ^b	0,4 ^a	1,40 ^b	3,0 ^b	<0,15	0,11 ^b	0,08 ^b	<0,01 ^c	0,08 ^{bc}
Torefikovaný	seno	21,4 ^a	26,9 ^b	0,27 ^b	3,8 ^b	<0,15	0,16 ^b	0,07 ^b	<0,01 ^c	0,06 ^{bc}
	sláma	10,6 ^b	2,0 ^a	0,11 ^b	1,3 ^b	<0,15	<0,025 ^c	0,02 ^b	2,19 ^a	0,05 ^c

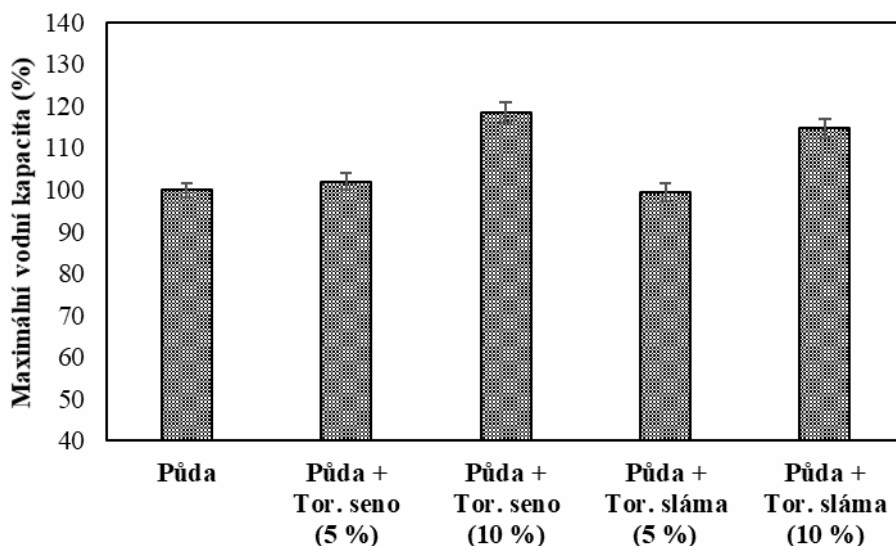
2.3 Zhodnocení vlivu torefikovaných materiálů na vodní retenční kapacitu půd

Grafy 1 a 2 zobrazují procentuální změny vodních retenčních kapacit u testovaných půd po přímé aplikaci torefikovaných materiálů. Z výsledků je patrné, že oba torefikované materiály (seno i sláma) mají takřka totožný vliv na schopnost půdy zadržovat vodu, přičemž však jejich účinek se výrazně odlišuje v závislosti na použité půdě. V případě Černozemě přídavek obou torefikovaných materiálů spíše snižoval celkovou retenční kapacitu směsi. Výrazně pozitivní vliv materiálů byl sledován při aplikaci na Fluvizem (Graf 2). Na tomto typu půdy přídavek 10 hm. % torefikované sena zvýšil celkovou vodní retenční kapacitu o 18 %, přičemž stejný přídavek torefikované slámy zvýšil kapacitu o 14 %. Přídavek nižšího množství (5 hm. %) torefikovaných materiálů vedl ke zvýšení retenční kapacity Fluvizemě přibližně o 2 % v případě sena, přičemž po aplikaci slámy nebyl pozorován měřitelný rozdíl.

Graf 1. Vodní retenční kapacita Černozemě a jejích směsí s aditivy



Graf 2. Vodní retenční kapacita Fluvizemě a jejích směsí s aditivy



3. Aplikace surovin v nádobovém pokusu při pěstování kukuřice

Předmětem dalšího studia bylo ověření spolupůsobení aditiv, klasického a alternativního hnojení v nádobovém experimentu.

3.1 Metodický přístup

Stanovení obsahu dusíku v rostlinném materiálu. Pro stanovení celkového obsahu dusíku byla použita metoda podle Kjeldahla. Celkový dusík zahrnuje organický dusík a dusík amonný. Při této metodě se vzorky mineralizovaly z 0,5 g naváženého rostlinného materiálu. Spalování se provádělo v kyvetách, do kterých se ke vzorkům přidal katalyzátor (selen) a koncentrovaná H_2SO_4 (10 ml). Spalování probíhalo 90 min. při teplotě 420 °C. Po zmineralizování se vzorky připravily na destilaci tím, že bylo ke každému přidáno 20 ml destilované vody. Poté se již destilační metodou na přístroji KJELTEC AUTO 1030 ANALYZER stanovil celkový obsah dusíku.

Stanovení celkového obsahu prvků v rostlinném materiálu. Rostlinný materiál byl rozložen na suché cestě: alikvotní podíl (~0.5 g) suché biomasy byl navážen do kádinek z křemenného skla a v daném teplotním režimu - 160, 220, 280, 350, 450 °C (za 1 hod.) a 500 °C po dobu 15 hod. spálen na popel. Následně byl popel rozpuštěn ve 20 ml 1,5% HNO_3 (obj.) (chemické čistoty, Analytika Ltd., Česká republika) (Mader a kol., 1998). Obsah rizikových prvků a dalších vybraných makro- a mikroelementů byl stanoven metodou optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., USA).

Stanovení obsahu dusíku ve fugátu. Pro stanovení celkového obsahu dusíku byla použita metoda podle Kjeldahla. Celkový dusík zahrnuje organický dusík a dusík amonný. Do mineralizační kyvety o objemu 250 ml bylo odváženo (po ručním promíchání odlitím) cca 10 g materiálu. Přidalo se 1,7 g katalyzátoru připraveného v třecí misce smísením 100 g K_2SO_4 , 1 g $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$ a 0,1 g práškového selenu. Kyvety se vzorkem a katalyzátorem byly umístěny do stojanu mineralizačního bloku automatického topného systému KJELDATHERM, zde bylo ke vzorkům automatickým dávkovačem s prodlouženou výtokovou hadicí přilito 10 ml koncentrované kyseliny sírové. Mineralizace probíhala za teploty 380 °C po dobu 30 minut. Poté se již destilační metodou na přístroji KJELTEC AUTO 1030 ANALYZER stanovil celkový obsah dusíku.

Metoda mikrovlnného rozkladu fugátu pro stanovení živin. Mikrovlnný rozklad byl proveden v kyvetách, do kterých bylo naváženo 0,5 g vzorku. Poté byly vzorky zalaty 8 ml HNO_3 a 2 ml H_2O_2 , podrobeny mikrovlnnému rozkladu za zvýšené teploty a tlaku, a vzniklý mineralizát byl odpařen. Obsahy celkových živin byly stanoveny atomovou absorpční spektrometrií s plamenovou atomizací na přístroji

Varian 280FS (Varian, Austrálie) a optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

Design experimentu. Byly vybrány dvě typově odlišné zeminy: Fluvizem a Luvizem. Do těchto půd byly aplikovány dva typy torefikovaného biouhlí: ze sena a ze slámy a to ve dvou dávkách 0,5% a 1,5%, které odpovídají reálným dávkám 15 a 45 t.ha⁻¹. Pokus byl prováděn v 5L plastových nádobách, kde byla zemina smíchána s aditivem. Hnojení bylo aplikováno ve formě klasicky používaného ledku amonného (NH₄NO₃) v dávce 0,5g N/nádoba. To bylo porovnáváno s netradičním organominerálním hnojivem, tekutým produktem bioplynových stanic, fugátem, bohatým především na dusík, draslík a fosfor. Dávka fugátu byla určena podle obsahu dusíku ve fugátu (0,3%), (tabulka 5) tak, aby rovněž odpovídala dávce 0,5gN/nádoba. Varianty, kde nebyl aplikován fugát, ale ledek amonný, byly přihnojovány draslíkem ve formě KCl (0,4g K/nádoba) a fosforem (0,08g P/nádoba) ve formě trojitého superfostátu, tak aby dávka těchto prvků odpovídala dávce dodané ve fugátu (dle obsahu přijatelných forem těchto prvků, stanoveného výluhem Mehlich III). Bylo celkem založeno 30 variant o čtyřech opakováních. Jako experimentální rostlina byla vybrána kukuřice, odrůda CORADI, mořené osivo. Ve druhém roce pěstování byly dávky aditiv a hnojiv přidány ve stejném množství jako předchozí rok. V průběhu experimentu byl odebrán půdní roztok pomocí vzorkovačů půdního roztoku (Rhizon MOM; Rhizosphere Research Products, Nizozemsko). Pro zdárné odebrání půdního roztoku bylo vždy potřeba nasytit půdu v každé nádobě na 60 % maximální vodní kapacity, což bylo prováděno gravimetricky. Následně byly na hadičky Rhizonů umístěny stříkačky a vodní roztok byl odebrán podtlakem. Pokus probíhal po dobu dvou let.

Tabulka 5. Celkový obsah vybraných prvků ve fugátu

Fugát	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	B	N
	mg.kg ⁻¹							%
	11491±730	58847±3697	48743±1111	10654±930	1411±916	223±14	37,2±1,2	0,34

3.2 Vliv surovin na výnos rostlin

Po sklizni pokusu prošla biomasa rostlin úpravami pro následující analýzy. Po dokonalém vysušení byl stanoven výnos nadzemní hmoty rostlin. Jednalo se vždy o průměr ze čtyř opakování dané varianty a tří rostlin pěstovaných v dané nádobě. Tabulka 6 ukazuje výnos nadzemní biomasy kukuřice. Výsledky ukazují, že výnos kukuřice byl vyšší na variantách, kde byla použita Fluvizem. Jestliže zhodnotíme sumární výnos dvou let, nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi variantami, kde bylo aplikováno hnojivo. Kde bylo aplikováno jenom aditivum, byly výnosy nejnižší a mezi typem a množstvím aplikovaného aditiva nebyl zjištěn významný rozdíl. Vy-

rovnanější výnosy mezi dvěma sledovanými lety byly zjištěny na Luvizemi, přičemž na některých variantách byl i průměrně vyšší. Z tohoto poznatku se dá usuzovat, že vyvážená kombinace hnojení a aditiv je pro úrodnost Luvizemě vhodná.

Tabulka 6. Výnos nadzemní biomasy ve dvou letech experimentu. Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Zemina	Typ hnojení	Dávka (%)	2017		2018		Celkem	
			Seno	Sláma	Seno	Sláma	Seno	Sláma
Fluvi- zem	0	0,5	31,1	30,0	11,8	14,4	42,9a	44,4a
		1,5	35,0	32,4	12,8	13,3	47,8a	45,7a
	NPK	0,5	59,9	78,1	47,2	38,9	107,1b	117,0b
		1,5	71,4	65,0	51,7	44,4	123,0b	109,3b
	Fugát	0,5	73,2	69,5	35,6	42,4	108,8b	111,9b
		1,5	69,5	70,0	35,6	42,2	105,1b	112,3b
	Kontrola	0	30,0		13,9		43,9a	
Luvi- zem	0	0,5	7,8	10,3	11,3	12,0	19,1a	22,2a
		1,5	9,4	10,4	10,7	10,6	20,1a	21,0a
	NPK	0,5	36,7	33,4	45,3	36,3	82,0c	69,7bc
		1,5	54,7	57,1	35,7	33,0	90,4c	90,1c
	Fugát	0,5	38,8	37,0	33,3	35,5	72,1b	72,5b
		1,5	32,4	33,7	34,7	34,9	67,1b	68,6b
	Kontrola	0	11,1		11,1		11,1a	

3.3 Odběr živin rostlinami kukuřice

Tabulky 7, 8 a 9 ukazují odběr hlavních živin rostlinou z půdy. Tato hodnota se vychází ze zjištěné koncentrace sledovaných prvků v rostlinách a jejich faktického výnosu (tj. odběr = koncentrace*výnos). Z toho vyplývá, že odběry dusíku, draslíku a fosforu byly vyšší na variantách s Fluvizemí v prvním roce. Dusík byl odebírán ve vyšších množstvích na hnojených variantách. Nehnojené varianty se v odběru dusíku nelišily v jednotlivých letech ani při sumárním hodnocení dvou let a v několika. U hnojených variant byl odběr dusíku významně nižší na některých variantách, kde byl aplikován fugát. Je možné, že vysoký obsah amoniakálního dusíku, obsažený ve fugátu, nebyl rostlinami přijímán tak ochotně, nebo vytěkal, na rozdíl od variant, kde byl aplikován dusík v i v nitrátové formě (varianty NPK). Nebyl pozorován rozdíl mezi variantami s různými typy a dávkami aditiva.

Tabulka 8. ukazuje odběr fosforu. Na Fluvizemi byl pozorován vyšší odběr fosforu na variantách, kde byl aplikován fugát, a to v případě vyšší dávky aditiv při sumárním hodnocení obou let. Odběr fosforu na Fluvizemi na variantách, kde bylo aplikováno pouze aditivum, byl stanoven průměrně vyšší než u kontroly, kde nebylo aplikováno hnojivo ani aditivum.

Tabulka 7. Odběr dusíku rostlinami kukuřice ve dvouletém pokusu. Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Zemina	Typ hnojení	Dávka (%)	2017		2018		Celkem	
			Seno	Sláma	Seno	Sláma	Seno	Sláma
Fluvi- zem	0	0,5	10,8	11,7	5,8	7,4	16,5 ^a	19,1 ^a
		1,5	12,1	10,2	5,5	5,6	17,6 ^a	15,8 ^a
	NPK	0,5	30,9	35,9	17,3	15,5	48,2 ^b	51,5 ^b
		1,5	33,5	24,6	17,7	16,7	51,2 ^b	41,2 ^b
	Fugát	0,5	25,1	28,7	12,4	16,3	37,5 ^c	45,0 ^b
		1,5	22,6	22,7	12,7	15,5	35,3 ^c	38,2 ^b
	Kontrola	0	11,1		6,5		17,5 ^a	
Luvi- zem	0	0,5	3,6	4,6	6,0	5,9	9,6 ^a	10,5 ^a
		1,5	4,5	5,2	5,3	5,4	9,9 ^a	10,6 ^a
	NPK	0,5	22,1	16,3	17,1	13,1	39,1 ^b	29,3 ^{ab}
		1,5	20,6	19,0	13,7	12,7	34,3 ^b	31,6 ^b
	Fugát	0,5	14,1	12,0	11,8	13,5	25,9 ^b	25,5 ^b
		1,5	7,8	14,3	13,2	14,0	21,0 ^b	28,3 ^b
	Kontrola	0	5,3		5,4		10,8 ^a	

Tabulka 8. Odběr fosforu rostlinami kukuřice ve dvouletém pokusu. Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

Zemina	Typ hnojení	Dávka (%)	2017		2018		Celkem	
			Seno	Sláma	Seno	Sláma	Seno	Sláma
Fluvi- zem	0	0,5	85,2	80,1	125,2	144,3	210,5 ^a	224,3 ^a
		1,5	55,9	107,5	141,9	155,6	197,8 ^a	263,1 ^{ab}
	NPK	0,5	127,3	159,8	155,7	125,8	283,0 ^{bc}	285,6 ^{cb}
		1,5	112,1	216,1	213,9	173,9	326,0 ^c	390,0 ^c
	Fugát	0,5	194,5	222,4	140,0	172,7	334,5 ^c	395,2 ^c
		1,5	255,3	260,2	165,0	197,3	420,3 ^d	457,5 ^d
	Kontrola	0	92,1		106,4		198,5 ^a	
Luvi- zem	0	0,5	24,0	18,6	117,7	113,0	141,7 ^a	131,6 ^a
		1,5	16,3	36,5	101,8	111,5	118,1 ^a	148,1 ^a
	NPK	0,5	110,0	68,8	151,1	121,1	261,2 ^b	189,9 ^{ab}
		1,5	175,4	125,0	125,3	121,2	300,7 ^c	246,2 ^b
	Fugát	0,5	196,7	81,8	119,4	144,3	316,1 ^c	226,1 ^b
		1,5	74,6	113,7	127,7	130,3	202,4 ^b	244,1 ^b
	Kontrola	0	41,3		106,5		147,8 ^a	

Odběr draslíku (tabulka 9) se vyznačoval nejvyšší variabilitou v rámci jednotlivých variant v rámci sledovaných prvků. Opět se neprojevil vliv aditiv a nejnižší odběry byly sledovány na nehnojených variantách. Při sumárním posuzování obou let

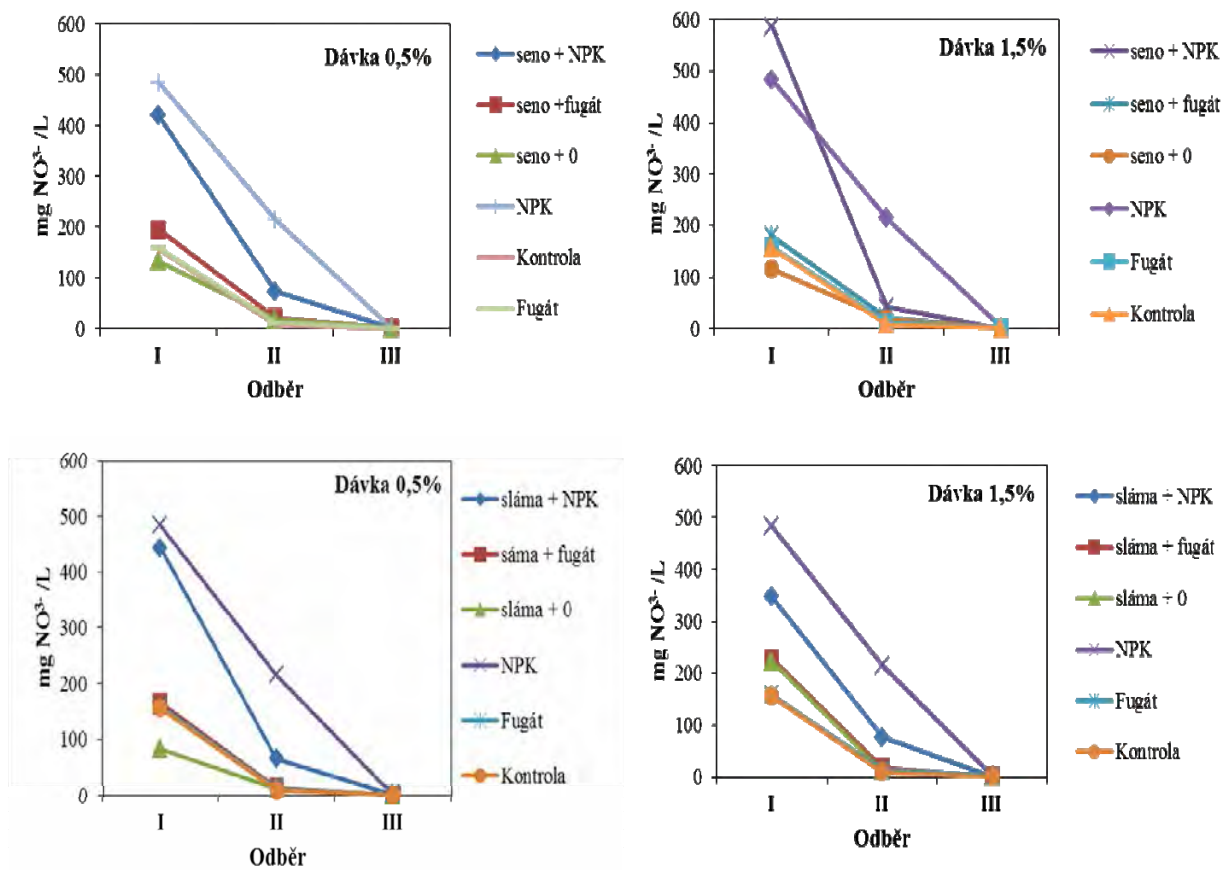
však byl již pozorován rozdíl při odběru draslíku rostlinami na variantách, kde bylo aplikováno aditivum bez přídavku hnojiva oproti kontrole bez hnojení a aditiva.

Tabulka 9. Odběr draslíku rostlinami kukuřice ve dvouletém pokusu. Rozdílná malá písmena ve sloupcích znamenají statisticky významný rozdíl mezi materiály vždy pro příslušný prvek dle jednofaktorové analýzy rozptylu ($p < 0,05$), $n=4$.

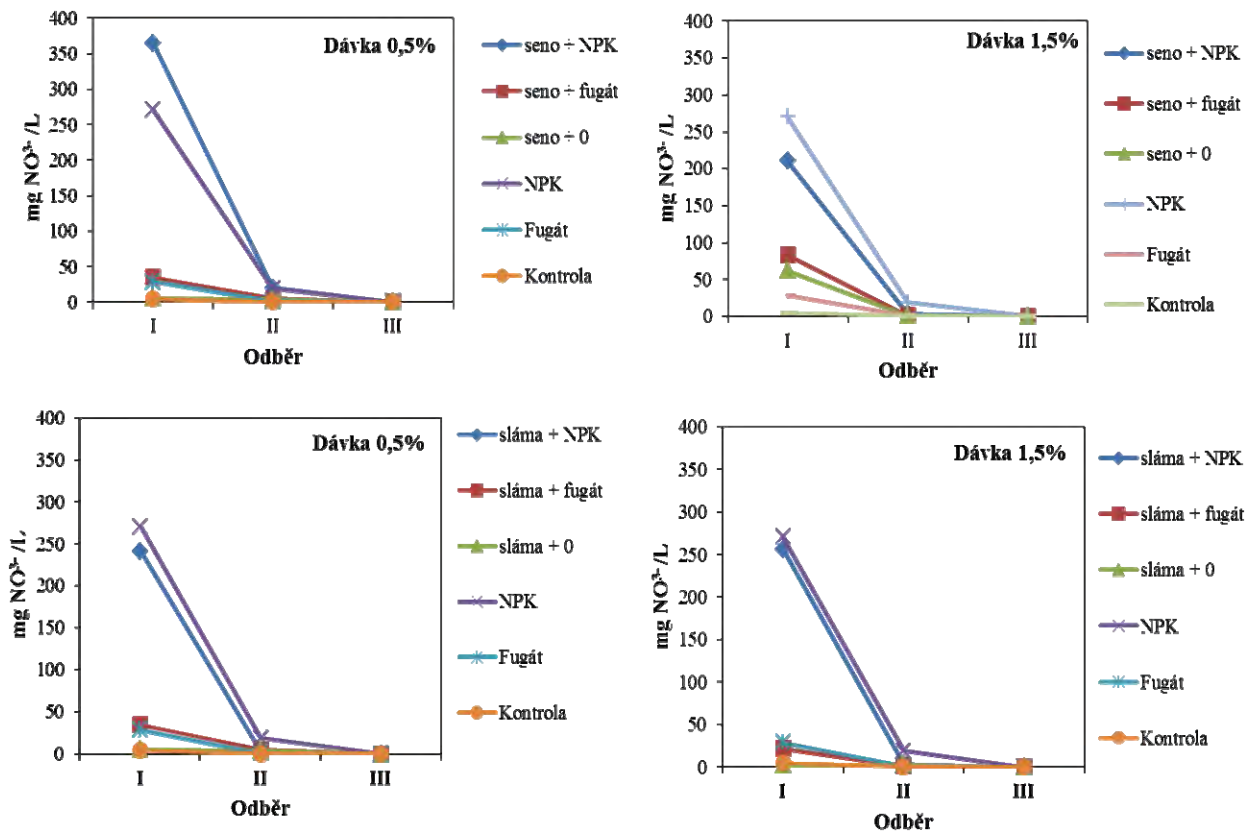
Zemina	Typ hnojení	Dávka (%)	2017		2018		Celkem	
			Seno	Sláma	Seno	Sláma	Seno	Sláma
Fluvizem	0	0,5	621	487	1056	1154	1677 ^a	1640 ^a
		1,5	490	676	1267	1260	1757 ^a	1936 ^{ab}
	NPK	0,5	1068	1228	2018	1452	3086 ^c	2680 ^b
		1,5	965	1429	3330	2773	4295 ^c	4202 ^c
	Fugát	0,5	1291	1532	1878	2028	3169 ^c	3560 ^c
		1,5	1395	1416	2270	2936	3664 ^c	4352 ^c
	Kontrola	0	588		731		1319 ^a	
Luvizem	0	0,5	159	142	931	788	1090 ^b	930 ^b
		1,5	162	225	775	830	937 ^b	1055 ^b
	NPK	0,5	805	628	2546	2433	3351 ^d	3061 ^d
		1,5	1107	958	2391	2320	3498 ^d	3279 ^d
	Fugát	0,5	925	552	1810	1600	2735 ^c	2152 ^c
		1,5	550	654	2155	1899	2705 ^c	2554 ^c
	Kontrola	0	244		517		761 ^a	

V průběhu nádobového experimentu byl odebírán půdní roztok. Grafy 2 a 3 ukazují obsah nitrátového dusíku v půdním roztoku během vegetace. Vyšší obsahy tohoto aniontu v půdním roztoku byly stanoveny na Fluvizemi, než na Luvizemi, kde mohla být omezená oxidace amonné formy. Nejvyšší koncentrace NO_3^- byly zjištěny na variantách, kde byla aplikována aditiva spolu s NPK hnojivem na obou typech půdy. Koncentrace NO_3^- na nehnojených variantách a na variantách s fugátem se shodovaly, protože dusík ve fugátu je obsažen především v kationtové formě.

Graf 2. Obsah nitrátového dusíku v půdním roztoku na variantách s Fluvizemí

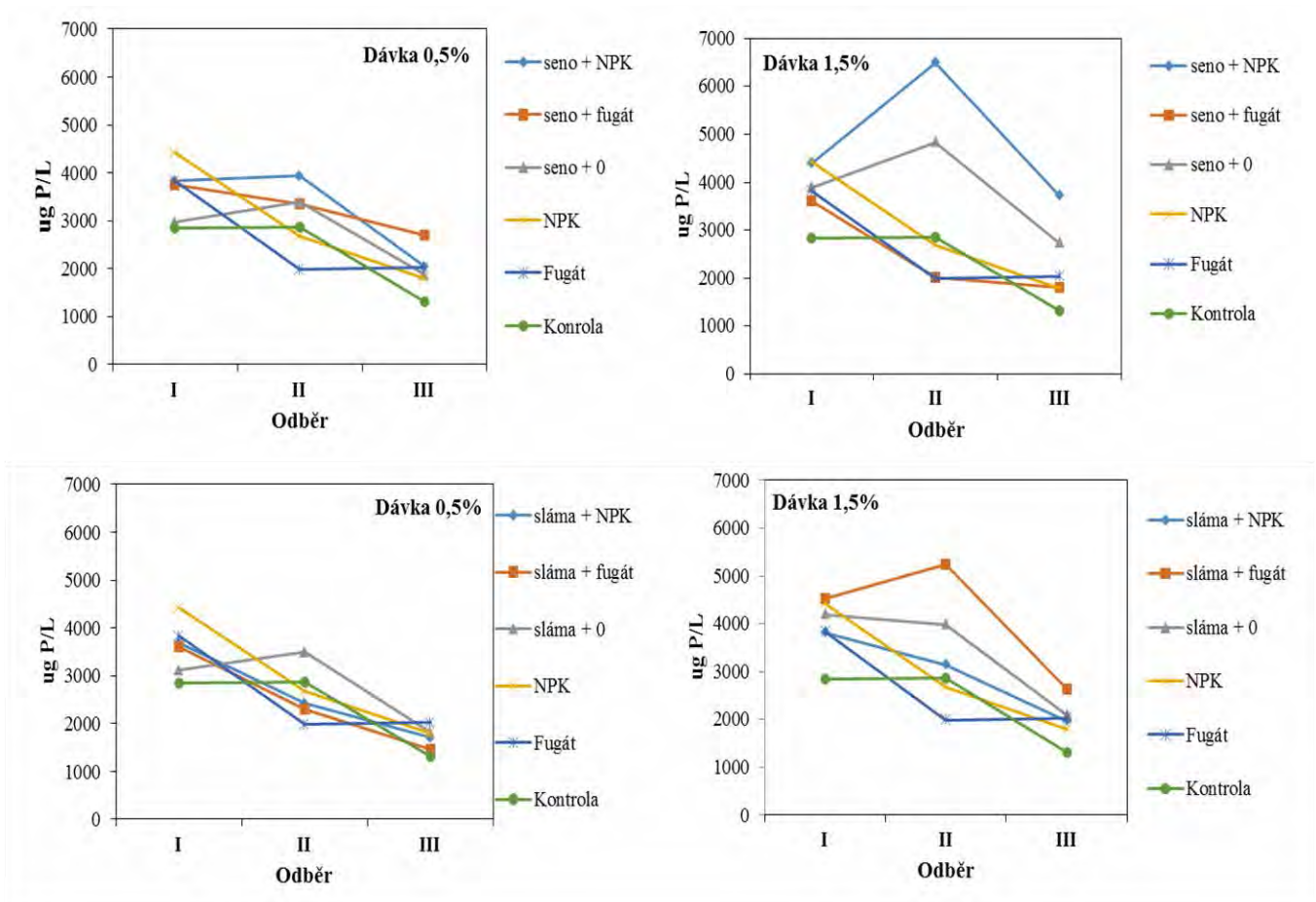


Graf 3. Obsah nitrátového dusíku v půdním roztoku na variantách s Luvizemí

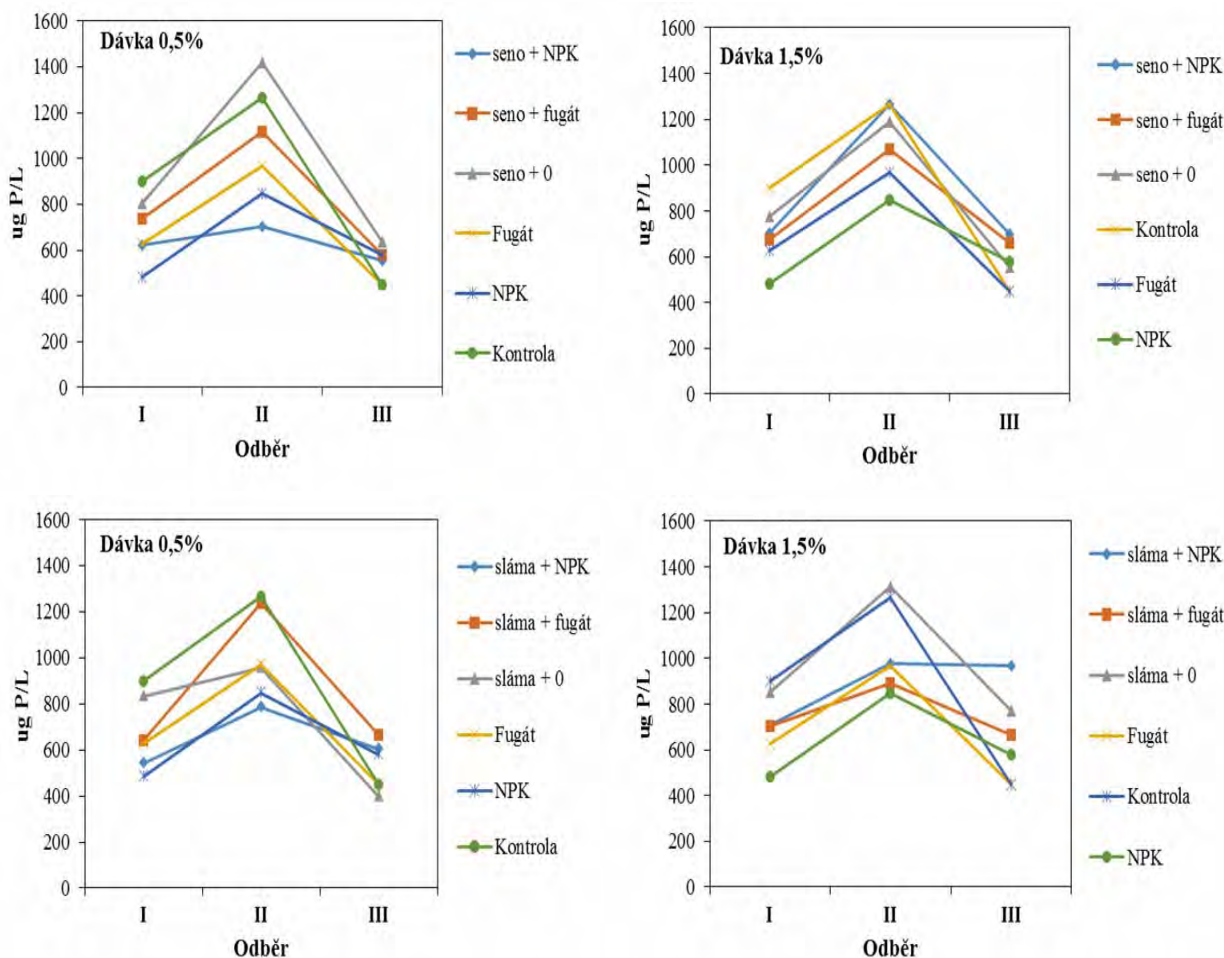


Grafy 4 a 5 ukazují, že koncentrace fosforu v půdním roztoku nezávisela na typu hnojení ani na typu aplikovaného aditiva. Vyšší koncentrace byly detekovány na Fluvizemi. Nejvyšší koncentrace fosforu v půdním roztoku na Fluvizemi byly stanoveny na variantách, kde bylo aplikováno aditivum seno v dávce 1,5 % spolu s NPK a sláma v dávce 1,5 % spolu s fugátem a dále aditivum seno v dávce 1,5 % bez hnojení a sláma v dávce 1,5 % bez hnojení.

Graf 4. Obsah fosforu v půdním roztoku na variantách s Fluvizemí



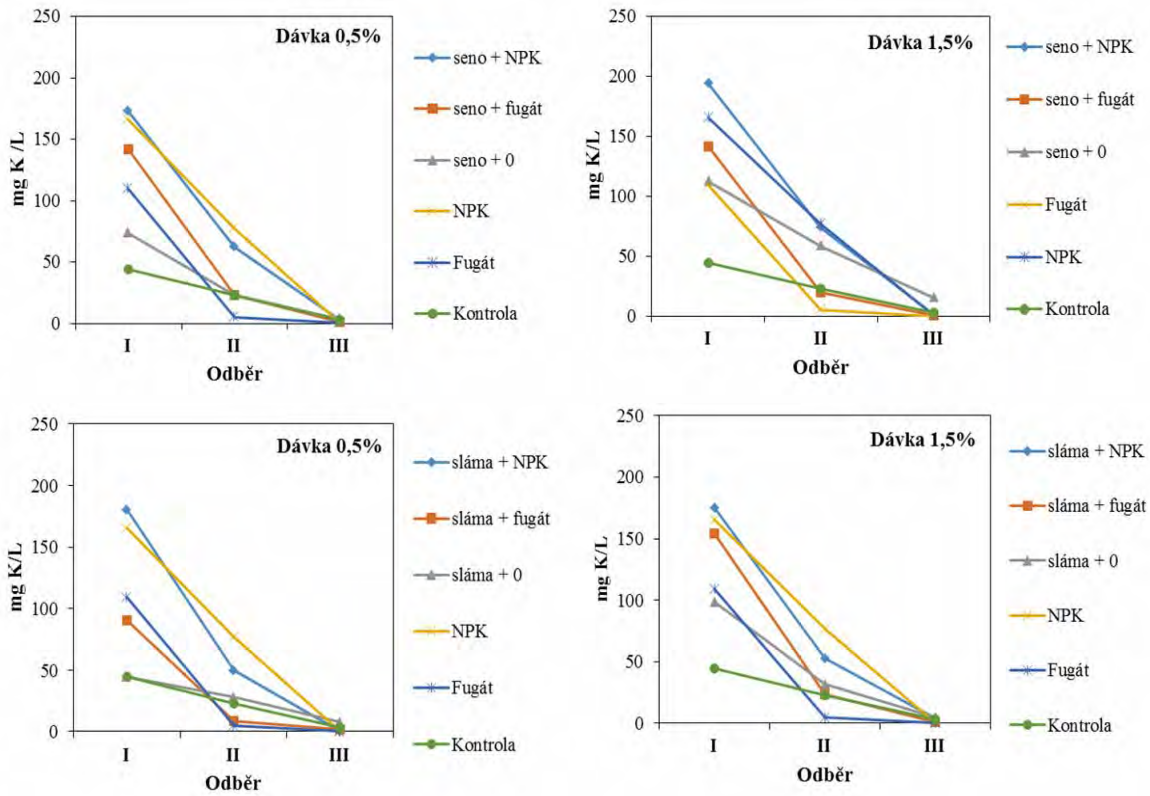
Graf 5. Obsah fosforu v půdním roztoku na variantách s Luvizemí



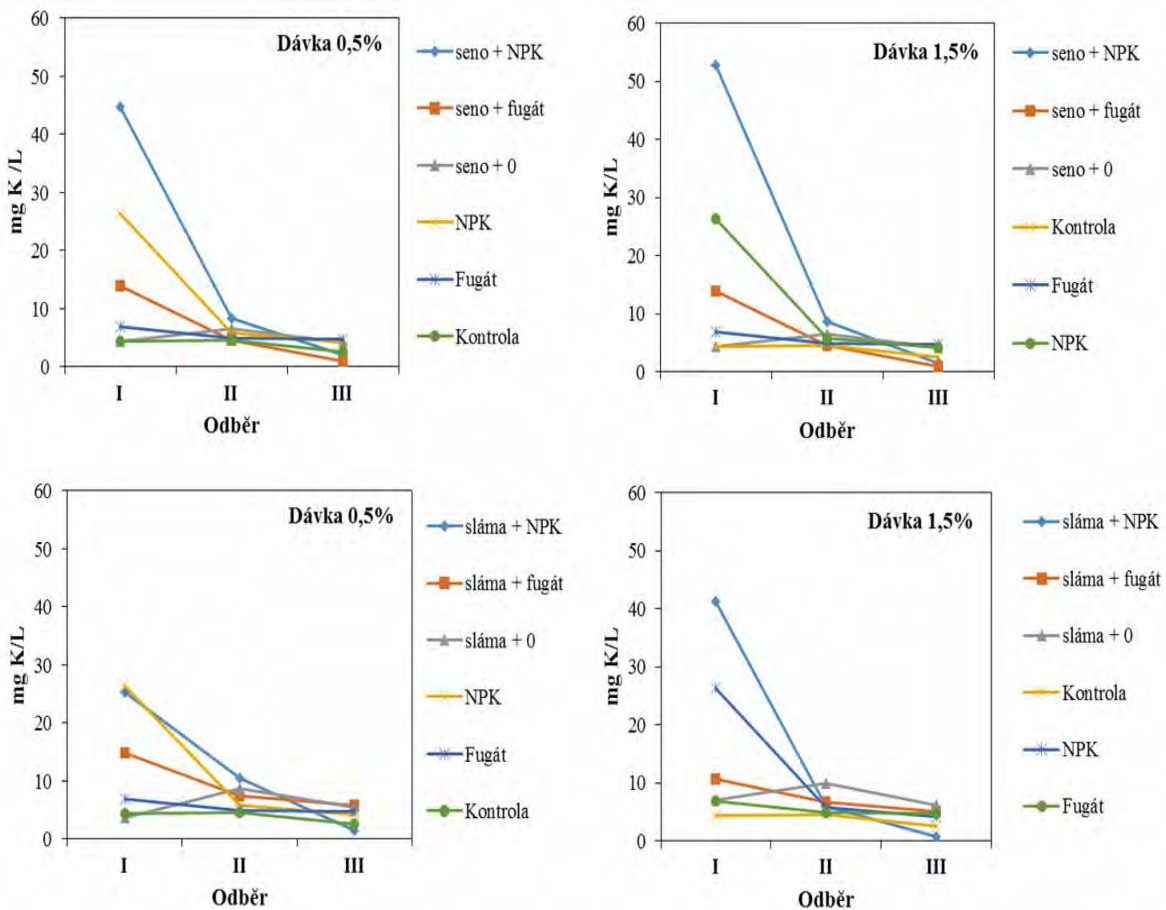
Obsah draslíku v půdním roztoku na Fluvizemi byl na počátku vegetace vyšší na hnojených variantách (grafy 6 a 7).

Na Luvizemi se ukázalo, že při druhém odběru se koncentrace draslíku zvýšila na variantách, kde byla aplikována pouze aditiva. Naproti tomu se na ostatních variantách koncentrace draslíku snížila. Je možné zde uvažovat o pozvolném uvolnění draslíku z aplikovaných aditiv (obsah draslíku v torefikovaném senu byl 2,4 % a v torefikované slámě 2,2 %).

Graf 6. Obsah draslíku v půdním roztoku na variantách s Fluvizemí



Graf 7. Obsah draslíku v půdním roztoku na variantách s Luvizemí



4. Aplikace torefikovaných materiálů v polním pokusu s kukuřicí

Předmětem dalšího studia bylo ověření účinku torefikovaných materiálů v reálných podmínkách polního experimentu.

4.1 Metodický přístup

Testovaná aditiva byla aplikována na Luvizemi, totožné s nádobovým experimentem v polních podmínkách výzkumné stanice Červený Újezd v roce 2018. Aditiva byla aplikována v dávce 6 t/ha. Působení aditiv bylo porovnáváno s působením tradičních minerálních hnojiv. Pro hnojení dusíkem byl použit ledek amonný s dolomitickým vápencem (LAD). Fosfor byl dodán jako trojitý superfosfát (TSP) a draslík jako draselná sůl (DS). Jako testovaná rostlina byla vybrána kukuřice pěstovaná na siláž (KWS Ronaldino Maxim XL). Hnojiva a aditiva byla aplikována na povrch a následně před setím zapravena do půdy. Experiment byl realizován jako parcelkový pokus s plně randomizovaným designem. Velikost jedné parcelky byla 30 m². Celkem bylo založeno 5 variant, každá ve čtyřech nezávislých opakováních. Kukuřice byla sklizena při sušině nadzemní biomasy v průměru 46 %. Popis variant experimentu:

Kontrola – nehnojená varianta

Pouze N – varianta hnojená pouze dusíkem v dávce 120 kg N/ha formou LAD

NPK – varianta hnojená dusíkem (120 kg N/ha v LAD), fosforem (20 kg P/ha v TSP) a draslíkem (40 kg K/ha v DS)

Tor. sláma – varianta s přídavkem torefikované slámy (6 t/ha) hnojená dusíkem (120 kg N/ha v LAD)

Tor. seno – varianta s přídavkem torefikovaného sena (6 t/ha) hnojená dusíkem (120 kg N/ha v LAD)

4.2 Vliv surovin na výnos silážní kukuřice

Výnos biomasy kukuřice pěstované na siláž je zobrazen v Tabulce 10. Výnos suché hmoty nadzemní biomasy se statisticky nelišil mezi jednotlivými variantami pokusu. Nejvyššího výnosu dosáhla varianta NPK (výnos 14,4 t/ha). Varianty, kde byla aplikována torefikovaná sláma (výnos 14 t/ha) nebo torefikované seno (výnos 13,9 t/ha) dosáhly v porovnání s variantou NPK nižšího výnosu, a to o 2,8 % v případě torefikované slámy a o 3,5 % u torefikovaného sena. V porovnání s variantou hnojenou pouze dusíkem (výnos 12,9 t/ha) však torefikované materiály vykazaly zvýšení výnosu biomasy o 8,5 % při použití slámy a 7,7 % pro torefikované seno.

Tabulka 10. Výnos nadzemní biomasy kukuřice v polním pokusu

Varianta	Výnos biomasy (t sušiny/ha)
Kontrola	13,1 ± 0,7 ²
Pouze N (120 kg N/ha) ¹	12,9 ± 0,9
NPK (120 kg N/ha; 20 kg P/ha; 40 kg K/ha)	14,4 ± 1,6
Tor. sláma (120 kg N/ha)	14,0 ± 0,9
Tor. seno (120 kg N/ha)	13,9 ± 0,9

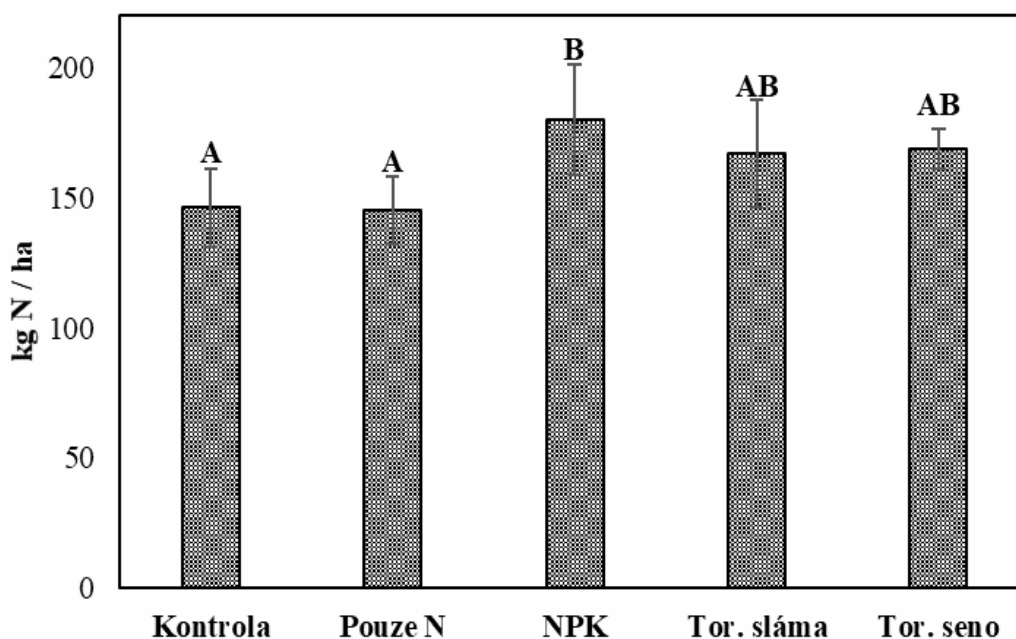
¹ hodnoty uvedené v závorkách představují množství živin dodaných formou minerálních hnojiv – LAD (N), TSP (P), DS (K)

² Zobrazen průměr ± směrodatná odchylka (n = 4)

4.3 Odběr dusíku rostlinami kukuřice

Odběr dusíku nadzemní biomasou kukuřice je zobrazen v Grafu 8. Odběr dusíku ve variantě NPK se statisticky významně lišil od kontrolní nehnojené varianty a varianty hnojené pouze minerálním dusíkem. Varianty, kde byly použity torefikované materiály se statisticky nelišily od varianty NPK. Nejvyššího odběru dusíku dosáhla varianta NPK (odběr 180 kg N/ha). Varianty, kde byla aplikována torefikovaná sláma (odběr 167 kg N/ha) nebo torefikované seno (odběr 169 kg N/ha) dosáhly v porovnání s variantou NPK nižšího odběru, a to 7,2, resp 6,1 %. Ve srovnání s variantou hnojenou pouze minerálním dusíkem (odběr 145 kg N/ha) byl pak odběr vyšší o 15 % v případě torefikované slámy a o 17 % při použití torefikovaného sena.

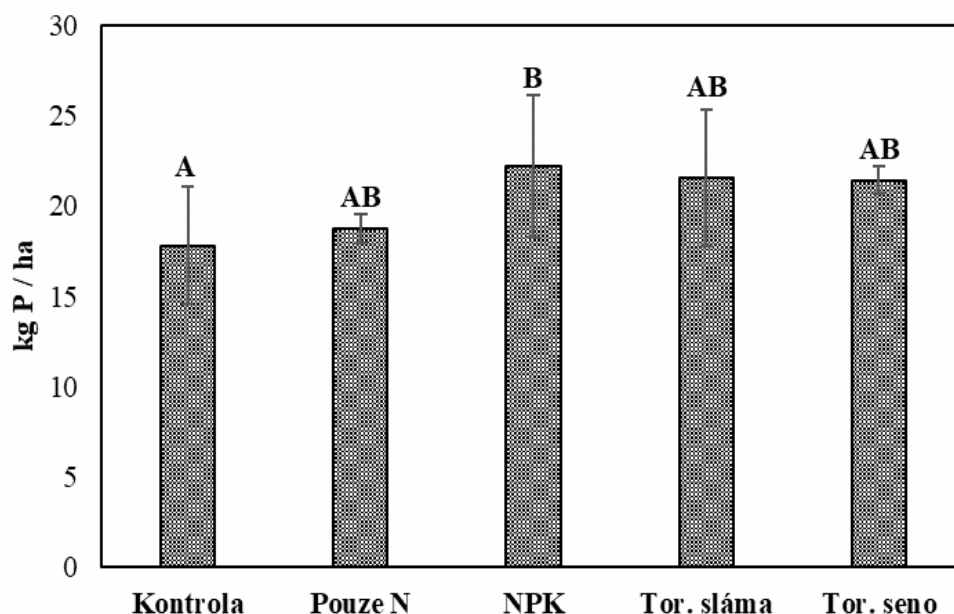
Graf 8. Odběr dusíku rostlinami kukuřice (Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl mezi variantami dle jednofaktorové analýzy rozptylu (LSD; $p < 0,05$; $n = 4$))



4.4 Odběr fosforu rostlinami kukuřice

Odběr fosforu nadzemní biomasou kukuřice je zobrazen v Grafu 9. Odběr fosforu ve variantě NPK se statisticky významně lišil pouze od kontrolní nehnojené varianty. Varianty, kde byly použity torefikované materiály se statisticky nelišily od varianty NPK. Nejvyššího odběru fosforu dosáhla varianta NPK (odběr 22,2 kg P/ha). Varianty, kde byla aplikována torefikovaná sláma (odběr 21,5 kg P/ha) nebo torefikované seno (odběr 21,4 kg P/ha) dosáhly v porovnání s variantou NPK nižšího odběru, a to 3,2, resp 3,6 %. Ve srovnání s variantou hnojenou pouze minerálním dusíkem (odběr 18,8 kg P/ha) byl pak odběr vyšší o 14,4 % v případě torefikované slámy a o 13,8 % při použití torefikovaného sena.

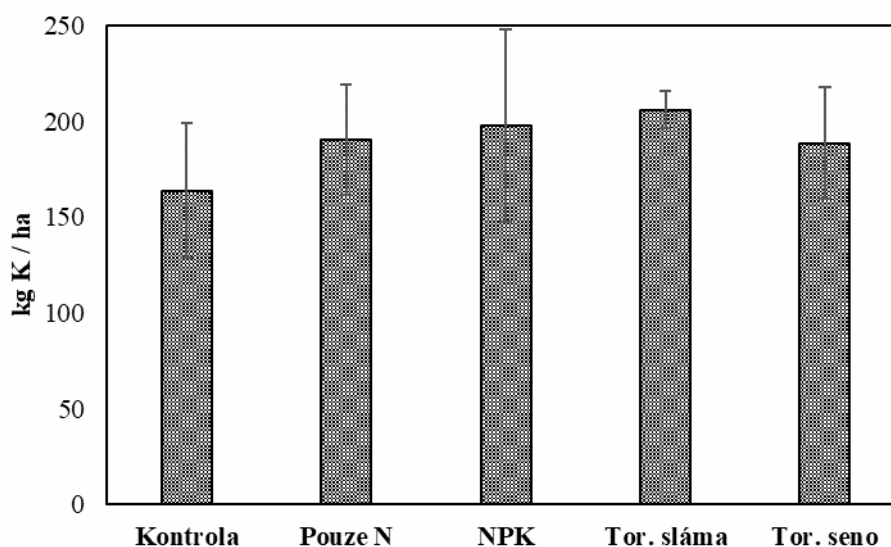
Graf 9. Odběr fosforu rostlinami kukuřice (Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl mezi variantami dle jednofaktorové analýzy rozptylu (LSD; $p < 0,05$; $n = 4$))



4.5 Odběr draslíku rostlinami kukuřice

Odběr draslíku nadzemní biomasou kukuřice je zobrazen v Grafu 10. V experimentu nebyl nalezen statisticky průkazný rozdíl mezi jednotlivými variantami v odběru draslíku nadzemní biomasou. Nejvyššího odběru draslíku dosáhla varianta, kde byla aplikována torefikovaná sláma (odběr 206 kg K/ha). Tento odběr byl o 5 % vyšší oproti variantě NPK (odběr 198 kg K/ha) a o 8 % vyšší než v případě varianty hnojené pouze dusíkem (190 kg K/ha). Varianta s aplikací torefikovaného sena (odběr 189 kg K/ha) pak vykázala o 4,1 % nižší odběr draslíku oproti variantě NPK a o 0,5 % nižší odběr ve srovnání s variantou hnojenou pouze dusíkem.

Graf 10. Odběr draslíku rostlinami kukuřice



III. Srovnání novosti postupů

Navržený postup úpravy surovin vedoucí k energeticky zhodnocené biomase a jejímu následnému využití jako půdního aditiva představuje možnou, environmentálně šetrnou aplikaci zachovávající či zlepšující přirozené funkce půdy.

Předložená metodika podává ucelený souhrn poznatků získaných studiem literatury a především vyhodnocením a zpracováním vlastních laboratorních a vegetačních pokusů, které probíhaly v letech 2017 – 2019, ve kterých byly vyhodnoceny vlastnosti slámy a sena upravené torefikací v porovnání s neupravenou surovinou, a jejich vliv jako půdního aditiva na růst rostlin na dvou odlišných půdách (fluvizemi a luviszemi). Zcela nově byla testována aditiva vzniklá nízkoteplotní pyrolýzou. Poznátka z provedených zkoušek a vegetačních experimentů lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Nízkoteplotní pyrolýzou – torefikací došlo k hmotnostnímu úbytku původního materiálu o cca 50 %, s tím že vznikající kapalná frakce o hmotnosti cca 40 % obsahuje řadu organických sloučenin využitelných k dalšímu zpracování. Torefikovaný materiál obsahoval zpravidla statisticky více živin než materiál původní. Obsah C dosahoval minimálně 55 %, významně zvýšený byl i obsah dalších živin, vyšší obsahy byly zpravidla stanoveny v torefikovaném senu. Obsah rizikových prvků byl nízký. Přístupnost živin i dalších hodnocených prvků se torefikací snížila a došlo tak k jejich stabilizaci.
- 2) Po aplikaci torefikovaných materiálů do Fluvizemě došlo k navýšení vodní retenční kapacity půdy. Při aplikaci torefikovaných materiálů na Černozem nebyl tento vliv pozorován.
- 3) Samotná aplikace torefikovaných materiálů neměla významný vliv na růst rostlin v porovnání s kontrolní variantou. Aplikace torefikovaných materiálů měla pozitivní vliv na růst rostlin pouze společně s aplikovanými hnojivy jak v minerální, tak v alternativní formě v podobě fugátu. Aditiva ve spolupůsobení

ní s hnojivy zajišťují kvalitní výnos kukuřice. Jejich aditiv jednoznačně způsobila zvýšené množství živin v půdním roztoku na začátku vegetace a to především v kombinaci s klasickými minerálními hnojivy. Aditiva ve spolupůsobení s hnojivy zajišťují vyšší odběr živin rostlinami v dlouhodobém měřítku a to především u draslíku a fosforu.

- 4) Námí navrhovaná metodika může být snadno proveditelná pro aplikace na zemědělskou půdu při pěstování širokého spektra zemědělských plodin.

IV. Popis uplatnění certifikované metodiky

- 1) Certifikovanou metodiku mohou využívat především zemědělské subjekty v rostlinné výrobě, které mají omezené zdroje stabilní organické hmoty, které mají zájem využívat k úpravě vlastní zdroje biomasy.
- 2) Zemědělské firmy hospodařící na kyselých půdách, na půdách s nízkou sorpční kapacitou a s nízkou retenční vodní kapacitou.
- 3) Podniky provozující bioplynové stanice, které hledají půdní aditiva pro šetrnější aplikaci kapalné části digestátu – fugátu na ornou půdu.
- 4) Firmy zabývající se torefikací organické zbytkové hmoty, jako návod na její uplatnění.

V. Ekonomické aspekty

- 5.1. Ekonomické přínosy aplikace torefikované organické hmoty se dají vyjádřit především množstvím vstupujících živin, popřípadě úpravou hodnoty půdního pH. Při aplikaci 1 t torefikované slámy resp. sena vstupuje do půdy 11 resp 20 kg N 7 až 12 kg P, 10 až 20 kg K v úhrnné ceně 1500 až 2300,- Kč a významné množství dalších živin včetně mikroživin, která jsou nezbytná k optimálnímu růstu rostlin a nejsou obsažena v běžných minerálních hnojivech.
- 5.2. Obtížně ekonomicky vyhodnotitelná je stabilizace C, omezující dnes tolik diskutované emise skleníkových plynů a stabilizace dalších živin redukující jejich možné ztráty rychlým uvolněním.
- 5.3. Je však nutné zmínit též náklady na vlastní torefakci, transport a aplikaci uvedených materiálů, které mohou do značné míry eliminovány využitím tepelné frakce jako zdroje energie a zejména zpracování kapalné frakce, která poskytuje celou řadu chemických sloučenin vyráběných synteticky nebo zpracováním ropy. Protože v současnosti není v ČR žádná torefikační jednotka v plném ani částečném provozu nedá se tato část ekonomicky vyhodnotit.

VI. Závěr

Metodika je prvotním dílem zabývajícím se využitím pevné frakce nízkoteplotní pyrolýzy – torefakce, je součástí projektu, jehož cílem je vybudovat na Severní Moravě provozní jednotku zpracovávající nadprodukcí biomasy. Jedná se především o organickou hmotu z luk, trvalých travních porostů, přebytečnou slámu, popřípadě

i další organické materiály, která bude po torefakci aplikována na ornou půdu s cílem zlepšit její fyzikálně chemické vlastnosti, dodat živiny a zvýšit retenční schopnost půdy.

V rámci metodiky byly v laboratorních podmínkách vyrobeny nízkoteplotní pyrolýzou sena a slámy torefikované materiály a jejich vlastnosti byly porovnány se surovinami. Následně byly tyto vzorky otestovány v nádobových pokusech a polním pokusu s kukuřicí.

Získané výsledky ukázaly, že torefakcí došlo k významnému úbytku pevné frakce za vzniku frakce kapalné, která je zdrojem řady organických sloučenin s širokou paletou uplatnění. Pevná frakce má neutrální hodnotu pH, významně vyšší obsah uhlíku, všech živin v porovnání se vstupní surovinou a jejich vyšší stabilizaci.

Stěžejní poznatky z realizovaných experimentů jsou snížení objemu hmoty sena a slámy. Dále procesem torefakce došlo k zvýšení koncentrace fosforu a draslíku u obou sledovaných materiálů. Samotná aplikace torefikovaných materiálů zvýšila vodní retenční kapacitu fluvizemě. Bylo zjištěno, že aplikace torefikovaných materiálů je vhodná spolu s aplikací dusíkatých hnojiv a to klasických i netradičních - fugátu.

VII. Seznam použité související literatury

- Amonette, J.E., Joseph, S. 2009. Characteristics of biochar: microchemical properties. In: Lehmann J., Joseph S. (eds.): Biochar for environmental management science and technology. Earthscan. London. p. 33–43.
- Angst T. I. E., Sohi S. P., 2013. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*, 5, 221–226.
- Antal, M.J., Gronli, M. 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42 (8), 1619-164
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., Pis, J. J. 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 169-175.
- Fisher, E. M., Dupont, C., Darvell, L. I., Commandré, J. M., Saddawi, A., Jones, J. M., Salvador, S. 2012. Combustion and gasification characteristics of chars from raw and torrefied biomass. *Bioresource technology*, 119, 157-165.
- Fonseca Felfli, F., Luengo, C.A., Bezzon G. and Beaton Soler, P., Bench unit for biomass residues torrefaction, *Biomass for Energy and Industry*, Proceeding of Int. Conf., Würzburg, Germany, 8-11 June, Ed. by Kopetz, Weber, Palz, Chartier and Ferrero, C.A.R.M.E.N., Rimpf Germany, 1998, p.1593-1595.
- Gaskin J. W., Steiner C., Harris K., Das K. C., Bibens B., 2008. Effect of temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(6), 2061-2069
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45 (8), 629-634.
- Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T. E., Papiernik S. K., Malo D. D., Clay D. E., Kumar S., Gulbrandson D. W., 2013. Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 179, 250–257
- Ibrahim, R. H., Darvell, L. I., Jones, J. M., & Williams, A. 2013. Physicochemical characterisation of torrefied biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 21-30.

- Lehmann, J. 2007. 'Bio-energy in the black'. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 381–387.
- Lehmann, J., Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management*. Science and Technology. Earthscan Publication Ltd. ISBN: 978-1-84407-658-1. pp. 449
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158, 436-442.
- Mukherjee A., Zimmerman A.R., 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*, 193-194: 122–130
- Novak, J. M., Ippolito, J. A., Lentz, R. D., Spokas, K. A., Bolster, C. H., Sistani, K., Johnson, M. G. 2016. Soil health, crop productivity, microbial transport, and mine spoil response to biochars. *BioEnergy Research*, 9(2), 454-464.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K.C., Schomberg H. 2009a. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3 (1), 2.
- Pach, M., Zanzi, R., & Björnbom, E. (2002, May). Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal. In 6th Asia-Pacific International symposium on combustion and energy utilization (Vol. 20).
- Rosa. J.M., Knicker, H., Capel, E., Manning, D. A.C., González-Perez, J.A., González-Vila, F.J. 2007. Direct detection of black carbon in soils by Py-GC/MS, carbon-13 NMR spectroscopy and thermogravimetric techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 258-267.
- Sun, F., Lu, S. 2014. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore - space properties of clayey soil. *Journal of plant nutrition and soil science*, 177 (1), 26-33.
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, van der Velde, M., Diafas, I. 2010. Biochar application to soils a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 149.
- Yuan, J. H., Xu, R. K., Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource technology*, 102(3), 3488-3497.
- Zheng, J., Chen, J., Pan, G., Liu, X., Zhang, X., Li, L., Jinwei, Z. 2016. Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China. *Science of The Total Environment*, 571, 206-217
- Wang, D., Li, Ch., Parikh, S. J., Scow, K. M., 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale Analysis. *Geoderma*, 340, 185-191
- Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Chintala, R., 2015. Influence of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 100-108

VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice

- Břendová, K. (Pračke, K.), Száková, J., Lhotka, M., Krulikovská, T., Punčochář, M., Tlustoš, P. 2017. Biochar physicochemical parameters as a result of feedstock material and pyrolysis temperature: predictable for the fate of biochar in soil? *Environmental geochemistry and health*. 39(6). 1381-1395.
- Břendová, K. (Pračke, K.), Tlustoš, P., Száková, J. 2018. Biochar applications enhance the phytoextraction potential of *Salix smithiana* [Willd.](willow) in heavily contaminated soil – potential for a sustainable remediation method? *Journal of Environmental Management*. under review
- Břendová, K. (Pračke, K.), Zemanová, V., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2016. Utilization of biochar and activated carbon to reduce Cd, Pb and Zn phytoavailability and phytotoxicity for plants. *Journal of Environmental Management*. 181. 637-645.

- Zemanová, V., Břendová, K. (Pračke, K.), Pavlíková, D., Kubátová, P., Tlustoš, P. 2017. Effect of biochar application on the content of nutrients (Ca, Fe, K, Mg, Na, P) and amino acids in subsequently growing spinach and mustard. *Plant, Soil and Environment*. 7. 322-327.
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., and Tlustoš, P. 2019. High Temperature-Produced Biochar Can Be Efficient in Nitrate Loss Prevention and Carbon Sequestration. *Geoderma* 338, 48–55.
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., and Tlustoš, P. 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments* 19, 2405–2416

IX. Dedikace

Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu **Torifikace:**
CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004771.

X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky

V souladu se závazným *Postupem pro uznání výsledku typu „Nmet – Certifikovaná metodika“*, který vydalo Ministerstvo zemědělství – Odbor výzkumu, vzdělávání a poradenství dne 9. května 2016, jsou v následujících podkapitolách uvedeny další požadované údaje nebo doplňující informace.

Jména oponentů a názvy jejich organizací

Posudek odborníka v daném oboru vypracoval: Ing. Martin Dubský, Ph.D. (*martin.dubsky@vukoz.cz*), Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v.v.i., Květnové náměstí 391, 252 43 Průhonice.

Posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy vypracovala: Ing. Michaela Budňáková (*budnakova@mze.cz*), Ministerstvo zemědělství ČR, Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1.

Podíly na vzniku předkládané metodiky

Na zpracování a finalizaci předkládaného výstupu projektu (certifikované metodiky) se členové řešitelského týmu s rolí spoluautorů metodiky zúčastnili níže uvedeným podílem: Pavel Tlustoš (10 %), Kateřina Pračke (60 %), Lukáš Kaplan (10 %), Filip Mercl (10 %), Jana Najmanová (10 %).

Osvědčení odborného orgánu státní správy

Osvědčení o uznání certifikované metodiky vydalo Ministerstvo zemědělství ČR.

Dne

Osvědčení č.:

OBSAH

I. Cíl metodiky	1
II. Vlastní popis metodiky	2
1. Úvod	2
2. Analýza vstupních surovin a torefikovaných materiálů	4
3. Aplikace surovin v nádobovém pokusu při pěstování kukuřice.....	8
4. Aplikace torefikovaných materiálů v polním pokusu s kukuřicí	17
III. Srovnání novosti postupů	20
IV. Popis uplatnění certifikované metodiky	21
V. Ekonomické aspekty	21
VI. Závěr	21
VII. Seznam použité související literatury	22
VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice	23
IX. Dedikace	24
X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky	24