



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Česká zemědělská univerzita v Praze
**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Uplatnění popelů ke hnojení a úpravě půdních vlastností

prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc.

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.



Proč je vhodné využívat popele ze spalování biomasy

- ❑ Popel – vedlejší produkt spalování biomasy
- ❑ Biomasa – obnovitelný zdroj energie (OZE)
- ❑ Závazek ČR – růst podílu OZE na celkové spotřebě energie
- ❑ Omezení skládkování
- ❑ podpora cirkulární ekonomiky



Jaká je produkce popela a kolik obsahuje živin

- **Produkce popela**

1 – 6 % ze suché hmoty
biomasy

- **Kvalita popelů je určena**

- složením biomasy
- podmínkami spalování
(teplota)

- **Obsah hlavních živin**

- N chybí
- Ca (7 - 45 %)
- K (5 – 14,5 %)
- Mg (4 – 6,5 %)



Na co je třeba dát si pozor

- **Obsah rizikových prvků**
 - vyšší Cd, Zn
- **Hodnota pH**
 - silně alkalické
- **Roštový x úletový popel**
rizikový je úletový
- **Polycyklické aromatické uhlovodíky**
 - riziko tvorby při vysokém nedopalu



Které suroviny se využívají ke spalování

- **Dřevní štěpka**
- Piliny
- Kůra
- Rychle rostoucí dřeviny
- Odpadní dřevní hmota
- **Sláma obilná, řepková**
- Seno
- Šťovík
- **Směsná biomasa**

Dendromasa

Fytomasa

Bioodpad



- **Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu**



Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu

certifikovaná metodika

Pavel Tlustoš a kol.



© Česká zemědělská univerzita v Praze
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ
165 21 Praha-Suchbátov
<http://www.af.czu.cz>

Vydavatelství powerprint s.r.o., Praha-Suchbátov

ISBN 978-80-213-2514-2

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci
řešení výzkumného projektu NAZV č. Q1102A207.

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



Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Pavel Tlustoš a kol.

Certifikovaná metodika byla zpracována
v rámci řešení výzkumného záměru NAZV č. QI102A207.

Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného záměru NAZV č. QI102A207“.

Kolektiv autorů:

prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc.
Ing. Pavla Ohecová
Ing. Lukáš Kaplan
prof. Ing. Jiřina Száková, CSc.
Ing. Jan Habart, Ph.D.

Technická spolupráce:

Ing. Jana Najmanová

Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu

Pavel Tlustoš a kol.

Vydání první, 2014

Vydavatelství: Česká zemědělská univerzita v Praze

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

165 21 Praha – Suchdol

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ

165 21 Praha 6 - Suchdol

tel.: +420 224 382 736

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

ISBN 978-80-213-2514-2

OBSAH

I. Cíl metodiky	1
II. Vlastní popis metodiky	1
1. Úvod	1
2. Podpora růstu rostlin.....	2
3. Efekt vápnění.....	3
4. Snížení mobility a biologické dostupnosti rizikových prvků.....	5
5. Redukce toxicity hliníku, manganu a železa pro rostliny	5
6. Zajištění podmínek pro mikroorganismy	5
7. Zlepšení fyzikálních vlastností půdy	6
8. Výsledky experimentů s popely ze spalování biomasy	6
9. Legislativa ve světě a v ČR	19
III. Srovnání „novosti postupů“	21
IV. Popis uplatnění certifikované metodiky	21
V. Ekonomické aspekty	21
VI. Závěr.....	23
VII. Seznam použité související literatury	23
VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice	25
IX. Dedikace	26
X. Jména oponentů a názvy jejich organizací	26

I. Cíl metodiky

Díky nové vyhlášce č. 131/2014 týkající se využití popelů na zemědělské půdě mohou od letošního roku čeští zemědělci aplikovat popel ze samostatného spalování biomasy, za přesně definovaných podmínek, na zemědělskou půdu, což pro producenty popelů představuje významné snížení provozních nákladů. Před rokem 2014 byl totiž tento popel považován za odpad a musel být ukládán na skládky.

Cílem předkládané metodiky tedy je na základě uskutečněných nádobových a přesných polních pokusů seznámit především zemědělce s chováním popelů po vstupu do půdy a s jejich vlivem na výnosové, výživové a některé další důležité parametry významných zemědělských plodin. Díky aplikaci popelů na zemědělskou půdu dochází k návratu cenných živin a k úpravě půdní reakce. Nabízí se tedy zejména využití těchto materiálů v oblastech s kyselými půdami, kde popel může sloužit jako náhrada za vápenec a navíc jako částečná náhrada za minerální hnojiva.

II. Vlastní popis metodiky

Metodika „Aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu“ zahrnuje výsledky testování hnojivých účinků popelů z nádobových i polních pokusů, zejména vliv přídatku popelů na výnos a kvalitativní parametry pěstovaných rostlin. Díky našim výsledkům si čtenář může vytvořit představu o benefitech a specifitě použití popelů ze spalování biomasy v zemědělství.

1. Úvod

Jednou z hlavních možností využití popela, jestliže se chceme vyhnout skládce, se jeví jeho použití jako hnojiva a to z důvodu vysokého obsahu bazických kationtů a živin (Ludwig et al., 2002; Arshad et al., 2012; Gómez-Rey et al., 2012; James et al., 2012; Moilanen et al., 2012; Norström et al., 2012), které zůstávají v popelu po spálení biomasy (Tulonen et al., 2012).

Využití popela jako hnojiva podporují i následující zjištění:

1. Podporuje růst rostlin, neboť přítomnost makroživin (Ca, K, S, Mg, P,) a mikroživin (Mn, Zn, Fe, B, Cu, Mo) zlepšuje prvkovou rovnováhu v ekosystému,
2. zásaditý charakter popela poskytuje neutralizační efekt jako při vápnění,
3. snižuje mobilitu a biologickou dostupnost rizikových prvků,
4. redukuje toxicitu hliníku, manganu a železa pro rostliny snížením výměnných obsahů jejich iontů v kyselých půdách,
5. zajišťuje biologickou aktivitu a podmínky pro některé mikroorganismy,
6. zlepšuje texturu, aeraci a vodní kapacitu půd (Vassilev et al., 2013).

Aplikace popela na půdu je zcela určitě oproti skládce, z hlediska ekonomického i environmentálního, výhodnější (Etiegni et al., 1990). Recyklace popela kom-

penzuje ztrátu živin způsobenou jejich odběrem při tvorbě biomasy, zlepšuje živinný režim na stanovištích chudých na živiny, zvyšuje úrodnost půdy a výnos plodin (Park et al., 2004; Moilanen et al., 2012). Aplikací popelů by se omezila spotřeba minerálních hnojiv, v oblastech postižených acidifikací by mohl sloužit díky své alkalitě k úpravě pH a producenti popela, tedy kotelny spalující biomasu, by ušetřily nemalé finanční prostředky spojené s ukládáním popelů na skládky (Etiegni et al., 1990; Zhang et al., 2002; Park et al., 2004). V zemích jako je Německo, Švédsko a Finsko je využití popela zaměřeno na jeho aplikaci na lesní půdy. Zpracování celých dřevin včetně posklizňových zbytků a korun s listy, které obsahují nejvyšší koncentrace živin, vedlo k myšlence živinové kompenzace formou popela ze spalování dřeva, aby nedocházelo k úbytku živin v lesních půdách (Obernberger a Supancic, 2009).

Demeyer et al. (2001) uvádějí, že potenciální aplikace popela v zemědělství nepředstavuje žádné významné riziko pro životní prostředí, jestliže není aplikováno nadměrné množství popela a je používán pouze popel ze spalování čisté biomasy.

S aplikací popela na půdu souvisí ale i otázky spojené s mírou dostupnosti živin obsažených v popelu pro rostliny, přítomností rizikových prvků a organických polutantů, kontaminací povrchových i podzemních vod, šokem ze skokové změny pH a poškození rostlin popálením, vysokou salinitou, změnou podmínek pro život mikroorganismů, prachovými emisemi, do jaké míry je popel spečený, předúpravou popela do formy granulí nebo peletek, ucpání půdních pórů a další (Vassilev et al., 2013).

Je proto nezbytné provádět testování nežádoucích účinků na půdní vlastnosti, podzemní vody a vegetaci (Park et al., 2004).

2. Podpora růstu rostlin

Uvádí se, že popel z dendromasy má pozitivní vliv na růst a výnos zemědělských plodin (Uckert et al., 2001; Patterson et al., 2004; Saarsalmi et al., 2010; Arshad et al., 2012; Park et al., 2012), což dokládá například i experiment Arshada et al. (2012), kteří na kyselých zemědělských půdách pěstovali ječmen, řepku a hrách. Aplikací popela se zvýšil výnos zrna ječmene až o 49 %, řepky o 59 % a hrachu o 55 %. Aplikací samotného zemědělského vápence se také zvýšil výnos, ale méně než u popela. Výnos zrna ječmene se zvýšil o 38 %, řepky o 31 % a hrachu o 49 %. Zvýšení výnosu bylo pravděpodobně ovlivněno množstvím fosforu obsaženým v popelu. Popel aplikovaný v dávkách ekvivalentních zemědělskému vápenci zlepšil fyzikální a chemické vlastnosti půdy a zvýšil produkci plodin.

Efektivní aplikační dávky dřevěného popela se ukázaly v případě ječmene 2 t/ha, u brambor 4 t/ha a u červené řepy dokonce až 9 t/ha (Butkuvienė, 2005). Hasler et al. (1998) doporučuje maximální aplikační dávku popela na zemědělskou půdu 8 t/ha jednou za 3 roky, vyšší dávky již neprokázaly příznivý vliv.

3. Efekt vápnění

Popel ze spalování biomasy, bez ohledu na původ, je alkalický (Campbell, 1990) a má podobné účinky jako vápenec (Pan a Eberhardt, 2011; Arshad et al., 2012), což je způsobeno vysokým obsahem a formou alkalických kovů v popelích (Kuba et al., 2008). Hodnoty pH popelů z dřevité biomasy jsou obecně vyšší než u popelů ze slámy a obilnin z důvodu vyššího obsahu vápníku a nižšího obsahu síry a chloru (Van Loo a Koppejan, 2008).

Hlavním důvodem nárůstu hodnoty pH u popelů z biomasy je ztráta organických kyselin v průběhu spalování a vznik rozpustných Ca, Mg, K a Na oxidů, hydroxidů, uhličitů a hydrogenuhličitů (Etiegni a Campbell, 1991; Zhang et al., 2002; Kuokkanen et al., 2009; Saarsalmi et al., 2010). Hodnota pH je dále ovlivněna spalovací teplotou a dobou skladování, neboť alkalita klesá s narůstající teplotou a dobou skladování (Demeyer et al., 2001). Při delším skladování může v popelu docházet k přeměně hydroxidů na uhličitany (Steenari a Lindqvist, 1997).

Prostor pro využití popela z biomasy je proto například u půd v horských vlhkých oblastech mírného pásu, které jsou často velmi kyselé s nízkou půdní úrodností. Z tohoto důvodu většina pastvin vyžaduje vápnění či jinou úpravu pro dosažení optimálního pH (Ferreiro et al., 2011).

Účinky různých dávek dřevního popela (2,5 a 5,0 t/ha) a vápence (1,0; 2,0 a 4,0 t/ha) na chemické vlastnosti půdy a růst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na kyselé lesní půdě se zkoumaly i například ve východním Finsku. Účinkem dřevního popela a vápnění se snížila kyselost jak organické vrstvy, tak minerální vrstvy půdy v hloubce 0 – 10 cm. Touto aplikací se následně výrazně zvýšil i růst borovice. Na pozemcích s popelem se růst zvýšil o 24 – 27 % a na vápněných plochách se zvýšil o 14 – 23 % (Saarsalmi a Levula, 2007).

Vliv popela na půdu se dále testoval v pěti porostech jehličnatých lesů. Popel se aplikoval v dávce 3 t/ha doplněné i o určité množství dusíku (120 – 150 kg N/ha). Po pěti letech po aplikaci popela se zvýšilo pH v humusové vrstvě o 1 – 1,7 jednotek a v minerální vrstvě půdy o 0,3 – 0,4 jednotek. Zvýšení bylo přibližně stejné i po deseti letech po aplikaci (Saarsalmi et al., 2004).

Změny pH půdy, na kterou byl aplikován popel, byly zkoumány například i v Kalifornii, kde ihned po aplikaci popela došlo ke zvýšení pH až o 3 jednotky na konečnou hodnotu pH 10,5 (Ulery et al., 1993).

Vliv aplikace popela na vlastnosti půdy a dynamiku živin závisí mimo jiné i na formě aplikovaného popela. Granulovaný dřevní popel aplikovaný na lesní půdě v Portugalsku nevykazoval významný vliv na pH, zatímco aplikace práškového popela zvýšila pH a snížila kyselost v horních vrstvách půdy (Ludwig et al., 2002).

Ohno (1992) studoval neutralizační kapacitu popela a zjistil, že pH se zvyšovalo zejména u půd s původně nízkým pH a nízkým obsahem organické hmoty. Rychlost neutralizace klesala s časem, vzhledem k rostoucímu pH půdy a komplexnímu složení popela. Reakční rychlost byla také ovlivněna velikostí částic popela.

Tabulka 1. Průměrné zastoupení prvků a další charakteristiky popelů ze spalování dřeva (průměr a rozmezí ze 37 vzorků popelů) a mletého vápence (%)

Prvek	Popel ze spalování dřeva^a	Vápenec
Ca	15 (2,5-33)	31,00
K	2,6 (0,1-13)	0,13
Al	1,6 (0,5-3,2)	0,25
Mg	1,0 (0,1-2,5)	5,10
Fe	0,84 (0,2-2,1)	0,29
P	0,53 (0,1-1,4)	0,06
Mn	0,41 (0-1,3)	0,05
Na	0,19 (0-0,54)	0,07
N	0,15 (0,02-0,77)	0,01
As	6 (3-10)	.
B	123 (14-290)	.
Cd	3 (0,2-26)	0,7
Cr	57 (7-368)	6,0
Cu	70 (37-207)	10,0
Pb	65 (16-137)	55,0
Hg	1,9 (0-5)	.
Mo	19 (0-123)	.
Ni	20 (0-63)	20,0
Se	0,9 (0-11)	.
Zn	233 (35-1250)	113,0
CaCO ₃ ekvivalent	43% (22-92%)	100%
pH	10,4 (9-13,5)	9,9

Zdroj: Risse a Harris, 2011

Dřevěný popel obsahuje okolo 50 % ekvivalentu uhličitanu vápenatého (Park et al., 2004), což potvrzuje i tabulka 1 a tento údaj udává množství alkalicky působícího CaO, které hnojivo dodává do půdy. Abychom tedy docílili stejného účinku jako při aplikaci vápence, museli bychom na danou plochu aplikovat dvojnásobnou dávku dřevěného popela. Popel navíc obsahuje oproti vápenci více cenných makro i mikro-prvků.

4. Snížení mobility a biologické dostupnosti rizikových prvků

Je známo, že mobilita většiny prvků obsažených v popelech z biomasy i uhlí je značně závislá na hodnotě pH a vyšší alkalita snižuje uvolnitelnost velké skupiny prvků (Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn a další), ale zvyšuje dostupnost specií As, B, Cr, F, Mo, Sb, Se, V a W (Izquierdo a Querol, 2012), což může být pro použití popelů omezující.

5. Redukce toxicity hliníku, manganu a železa pro rostliny

Na kyselých půdách je vyšší koncentrace mobilního Al, Mn a Fe, což může vést k jejich toxickému působení na rostliny.

Příznaky toxicity hliníku nejsou na rostlině zprvu snadno identifikovatelné. Pokud se ovšem zaměříme na podzemní část, zaznamenáme toxický efekt hliníkových iontů již v prvních minutách působení. Hlavní symptom Al^{3+} toxicity u rostlin je totiž inhibice růstu kořene. Kořeny také vykazují vyšší známky buněčného poškození než jiné části rostliny. Kořenový systém jako celek je zkroucený s mnoha zavalitými bočními kořeny a postrádá jemné větvení (Poschenrieder et al., 2008), což je neefektivní při čerpání živin i vody.

Vysoká koncentrace manganu je toxická pro výhonky. Na rozdíl od Al, který má často okamžitý účinek na proliferaci kořenů, Mn se musí nahromadit ve výhoncích, aby se stal toxický. Výsledkem akumulace Mn jsou tři typy příznaků: tmavě hnědé, nekrotické skvrny na spodních listech, narušení rostoucích listů a chlorózy mladých listů (Atwell et al., 1999).

Toxicita železa není častá, nicméně některé rostliny vylučují z kořenů kyseliny, které snižují pH půdy. Tyto rostliny poté přijímají nadbytek železa, což může vést k toxicitě. Mezi symptomy patří bronzové zbarvení a tečky na listech (Atwell et al., 1999).

6. Zajištění podmínek pro mikroorganismy

Hodnota pH půdy je velmi důležitým parametrem, který určuje složení společenstev půdních organismů, jejich diversitu i jejich početnost. Má vztah k půdní úrodnosti, protože neutrální až alkalické půdy bývají do značné míry nasyceny kationty, které jsou zároveň nepostradatelnými živinami požadovanými při růstu rostlin. Na základě dat z velkého množství půd je možné učinit závěr, že nejvyšší diverzita bakteriálních společenstev existuje v půdách, které jsou neutrální či slabě kyselé, a klesá s klesající hodnotou pH. Kromě toho bakteriální diverzita záleží na chemismu půd, tedy obsahu například minerálních iontů. Naproti tomu překvapivě nelze doložit, že

by se měnila například v závislosti na zeměpisné šířce či průměrné teplotě a dokonce ani v závislosti na průměrných srážkách (Gryndler, 2013).

Další oblastí, kde by bylo vhodné popel využít, je technologie kompostování. Bioodpad jako složka kompostu má obvykle nízké pH a na začátku dekompozičního procesu tak může narůstat počet mezofilních mikroorganismů - bakterií mléčného kvašení a kvasinek, což je pro efektivní biochemickou degradaci bioodpadu nežádoucí (Kurola et al., 2011). Popel ze spalování dendromasy je tedy vhodný jako doplněk do kompostu díky jeho schopnosti upravit pH a omezit zápach kompostu. Koivula et al. (2004) ve své studii uvádějí, že 20-ti % hmotnostní přídavek popela do kompostu omezil emisi H_2S a snížil tvorbu nepříjemného oděru během kompostování. K podobným závěrům dospěli i Rosenfeld et al. (2004) při 25 % obohacení kompostu popelem. Ve studii Bougnoma et al. (2009) dospěli k závěru, že přídavek popela kromě nárůstu pH snížil i vyplavování dusičnanů. Abychom získali finální produkt - kompost, který bude bezpečný i z environmentálního hlediska, doporučují Kurola et al. (2011) přídavek popela mezi 4 a 8 hmotnostními %.

7. Zlepšení fyzikálních vlastností půdy

Popel ze spalování biomasy je složen z jemných částic, které bobtnají po styku s vodou a popel tedy ovlivňuje strukturu, provzdušňování, vododržnou kapacitu, salinitu a hydraulickou vodivost půdy (Perucci et al., 2006).

8. Výsledky experimentů s popelem ze spalování biomasy

8.1 Vlastnosti použitých popelů

Předmětem experimentů bylo verifikovat hnojivé účinky popelů ze spalování biomasy na růst vybraných rostlin. V nádobových vegetačních experimentech se jednalo konkrétně o jílek vytrvalý, pšenici jarní, v polních pokusech byly sledovány účinky popelů na růst a parametry pšenice ozimé a cukrové řepy.

Pro pokus s jíllem vytrvalým byl použit úletový popel z Plzně - největší spalovny biomasy v ČR, pro pokusy s ostatními plodinami byl použit popel ze spalování dřevní štěpky a slámy. Zjištěné hodnoty rizikových prvků v popelech splňovaly ve všech případech limity stanovené novou vyhláškou (tabulka 2).

Vyhodnotíme-li analýzy použitých popelů (tabulka 2), zjistíme, že se odlišují zejména v obsahu rizikových prvků, kdy popel ze dřeva obsahuje výrazně více arsenu, kadmia, chromu, mědi, niklu, olova i zinku. Co se týče živin, více draslíku i fosforu bylo stanoveno v popelu ze spalování slámy. Oba materiály jsou silně alkalické s minimálním obsahem dusíku, neboť dusík z biomasy rostlin odchází při spalovacím procesu ve formě oxidů dusíku.

Tabulka 2. Chemický rozbor popela ze slámy a ze dřeva

	Popel-sláma	Popel-dřevo	Popel-dřevo Plzeň
As (mg/kg)	1,87	9,54	43,1
Cd (mg/kg)	0,44	3,1	4,1
Cr (mg/kg)	17,1	41,2	35,7
Cu (mg/kg)	77,5	99,1	98,7
Hg (mg/kg)	0,021	0,02	0,03
Mo (mg/kg)	4,6	4,1	10
Ni (mg/kg)	11,7	35,4	61,4
Pb (mg/kg)	5,55	24,8	36,6
Zn (mg/kg)	294	654	730
K jako K ₂ O (g/kg)	143	71,2	71,1
P jako P ₂ O ₅ (g/kg)	82,6	49	23,2
pH (H ₂ O)	12,06	12,79	11,83
Spalitelné látky (%)	4,32	<0,5	2,33

8.2 Metody použité ke stanovení hodnocených parametrů

Stanovení sušiny. Sušina byla stanovena vázkově a vyjádřena v %. Nejprve byla zvážena hliníková miska, poté byla zvážena čerstvá hmota vzorku. Vzorek byl sušen při 105 °C 8 hodin, poté byl zvážen úsušek i s miskou a odečtením hodnot byla zjištěna sušina.

Metoda mikrovlnného rozkladu rostlinného materiálu pro stanovení makroživin. 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 P, K, Ca, Mg, Al 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.

Metoda mikrovlnného rozkladu půdy pro stanovení makroživin. 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 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 tubách, do kterých se ke vzorkům přidal Se-katalyzátor 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 přijatelných forem prvků metodou podle Mehliche III. Vzorek se extrahuje 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.

Navážku 5 g zeminy vzorku přelijeme ve třepací láhvi 50 ml extrakčního činidla, třepeme 10 minut. Suspenzi filtrujeme přes papírový filtr. Filtrát měříme na atomovém nebo emisním spektrometru.

Kolorimetrické stanovení organického C podle Simse a Habyho. Do 100 ml širokohrdlých odměrných baněk se naváží 1 g zeminy, přidá se 10 ml $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a 10 ml koncentrované H_2SO_4 . Pečlivě promísíme a ponecháme 20 minut stát. Potom se obsah baňky zředí destilovanou vodou asi na objem 90 ml, pod proudem vody ochladí a doplní destilovanou vodou na celkový objem 100 ml. Promísí se a zfiltruje. Filtrát se proměří na kolorimetru při vlnové délce 600 nm. Obsah C vypočteme z kalibračního grafu. Pro předpokládaný obsah uhlíku nižší než 1 % je vhodné navažovat k analýze 2 g zeminy, pro obsah vyšší než 2,5 % C snížit navážku na 0,5 g zeminy.

Stanovení obsahu dusíku v zemině a pěstebních směsích. Jednotlivé formy dusíku byly stanoveny v čerstvé hmotě kolorimetrickou metodou analyzátoru SKALAR SAN^{PLUS} SYSTEM (Skalar, Holandsko). Příprava vzorku k analýzám spočívala ve výluhu 10 g vzorku ve 100 ml 0,01 M CaCl_2 a třepání 2 hodiny.

Stanovení hodnoty pH. Z chemických vlastností byla měřena hodnota pH vodného výluhu demineralizované vody v poměru 1 : 10, přičemž bylo naváženo 10 g vzorku, který byl zalit 100 ml vody. Měření bylo provedeno kalibrovaným pH metrem.

8.3. Nádobové experimenty

8.3.1 Jílek vytrvalý

Pro nádobový pokus s jílkem vytrvalým byl použit úletový popel z Plzně ve formě práškové i slisované do „čoček“, které byly v některých variantách obohaceny o další příměsi. Jílek vytrvalý byl zvolen pro účely našeho experimentu z důvodu ověření vhodnosti hnojivých účinků popele z biomasy na této trávě, která je hlavní

součástí travních směsí. Popel ze spalovny v Plzni jsme použili z důvodu, že tato konkrétní spalovna je prozatím největší spalovnou biomasy v ČR s největší produkcí popele.

Tabulka 3. Schéma pokusu s jíllem vytrvalým

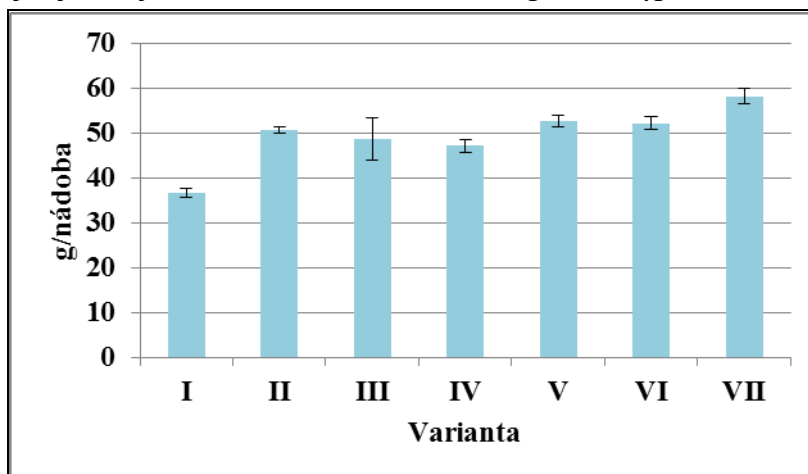
Varianta	Podíl popela v hnojivu (%)	Dávka popela (g)	Forma	Aditivum v popelu
I	0	0	-	bez příměsí
II	100	100	prášek	bez příměsí
III	90	111,1	"čočka"	bez příměsí
IV	88	113,6	"čočka"	fosfát
V	78	128,2	"čočka"	fosfát + sádrovec
VI	70	142,9	"čočka"	sádrovec
VII	52	192,3	"čočka"	sádrovec z vyplaveného fosfátu + sádrovec z odsíření

V I. variantě byla pouze zemina bez příměsí popela a sloužila nám jako varianta kontrolní. Jako pokusná zemina byla zvolena kambizem z oblasti Humpolce, neboť tento půdní typ je v České republice zastoupen nejhojněji, a navíc hodnota pH této zeminy je nízká (pH 5), a proto by mohla být pro aplikaci zásaditého popela vhodná. Všechny varianty byly při založení a po 1 a 2. seči přihnojeny 0,5 g N/nádobu ve formě NH_4NO_3 .

Obrázek 1. Pokusné nádoby jílku vytrvalého v jednotlivých variantách



Tabulka 4. Celkový výnos jílků za 4 seče během vegetace (g suché hmoty/nádoba)



Z grafu celkového výnosu je zřejmé, že přidavek popela zvýšil výnos jílků ve všech obohacených variantách. Nejvýrazněji se popel projevil ve variantě VII., kde jílky dosáhly téměř o polovinu vyšších výnosů ve srovnání s kontrolou.

Tabulka 5. Průměrné přístupné obsahy (Mehlich III) živin v půdě po ukončení pokusu (mg/kg)

varianta	K	Ca	Mg	P	S
I - zemina	93	1019	120	88	12
II	4476	24370	3172	105	3165
III	4401	13250	1799	216	2260
IV	3870	16736	2474	1094	3126
V	5317	16181	2720	4655	6757
VI	3102	13471	1602	96	10265
VII	6524	13838	1510	4243	10626

V půdě na konci pokusu byl ve všech obohacených variantách prokazatelně vyšší obsah přístupných živin oproti kontrole, zejména ve variantách V a VII. Největší nárůst v obsahu přístupných živin byl patrný, podobně jako v případě rostlinného materiálu, u síry.

Tabulka 6. Průměrné obsahy živin (za 4 seče) v jílku vytrvalém (mg/kg)

varianta	K	Ca	Mg	P	S
I	32777	6213	2323	2588	3069
II	37577	5963	2335	2744	5525
III	39063	5860	2353	2568	6539
IV	35710	5857	2151	2555	5808
V	38217	5479	2256	2651	6416
VI	36614	5930	2328	2366	7627
VII	37531	5264	2237	3169	6103

V případě draslíku se ve všech sečích projevil pozitivní vliv aplikace popela, neboť všechny hnojené varianty dosahovaly vyšších hodnot ve srovnání s kontrolou. Nejvýznamněji se zvýšený obsah draslíku v rostlinách projevil u variant V., VI. a VII.

Obsahy vápníku v jílku vytrvalém neprokázaly významný vliv přídavku popela do pokusných nádob. V 1. seči byly vyšší obsahy vápníku ve srovnání s kontrolou stanoveny pouze ve variantách II., III., a VI., ve 2. a 3. seči dosahovala kontrola nejvyšších výnosů, z obohacených variant měla nejlepší výsledky varianta II. - přídavek popela v práškové formě. Ve 4. seči se výrazněji projevila varianta VI. a také vliv úpravy popela do „čoček“.

Obsahy hořčíku v jílku vytrvalém také neprokázaly významný vliv přídavku popela do pokusných nádob. V 1. a 4. seči byly nejvyšší obsahy ve variantě VI., ve 2. seči dominovala kontrola a ve 3. seči varianta II. Nebyl patrný ani rozdíl v úpravě popela.

Z hlediska obsahu fosforu v rostlinách je zřejmé, že nejvýraznější nárůst fosforu, v porovnání s kontrolou, byl zaznamenán ve všech sečích ve variantě VII, přestože v nejvíce přístupné formě byl fosfor obsažen ve směsi čoček, které byly přidávány do varianty V.

Nejvýznamnější nárůst obsahu živiny v jílku ve variantách s popelem byl pozorován u síry. Obohacené varianty dosahovaly dvojnásobných i vyšších obsahů v porovnání s kontrolou. Vyšší obsahy byly ve variantách, kam byl popel aplikován ve formě „čoček“ oproti formě práškové.

8.3.2 Pšenice jarní

Experiment s pšenicí jarní (odrůda *Scirocco*) byl založen do 5-ti litrových nádob, které byly naplněny zeminou z oblasti Příbramska a oseto 30 semeny pšenice jarní, později byly rostliny vyjednoceny na konečný počet 20 rostlin/nádobu. 6 variant pokusu ve 4 opakováních mělo následující podobu:

Tabulka 7. Schéma pokusu s pšenicí jarní

Pšenice jarní – varianty pokusu		
I	Kontrola nehnojená	Zemina
II	Kontrola NPK	Zemina + PK + N
III	Popel – štěpka Dávka I	Zemina + popel ze dřeva (11,9 g) + N
IV	Popel – štěpka Dávka II	Zemina + popel ze dřeva (23,8 g) + N
V	Popel - sláma, Dávka I	Zemina + popel ze slámy (8,5 g) + N
VI	Popel - sláma, Dávka II	Zemina + popel ze slámy (17 g) + N

Vysvětlivky ke schématu (tabulka 4):

- PK + N – nádoby ve variantě II byly při založení hnojeny 0,75 g N/nádoba ve formě NH_4NO_3 , dále 0,16 g P a 0,4 g K/nádoba ve formě K_2HPO_4
- N - nádoby ve variantách III - VI byly při založení hnojeny 0,75 g N/nádoba ve formě NH_4NO_3
- Dávky byly stanoveny dle předpokládaného odběru 1 g K rostlinou/nádobu a dle odlišných obsahů K v popelích (viz tabulka 2)

Rostliny byly pravidelně ošetřovány a zalévány. V průběhu vegetace byly rostliny (varianty II – VI) přihnojeny 0,5 g N/nádoba a nádoby byly přikryty ochrannou sítí proti ptactvu, neboť hrozilo nebezpečí vyzobávání semen z klasů.

Pšenice byla sklizena v plné zralosti, zvážena a následně vysušena. Získané výsledky z uskutečněných analýz rostlin i půdy jsou uvedené níže.

Tabulka 8. Výnos zrna a slámy (g/nádoba)

Varianta	Zrno		Sláma	
	x	s	x	s
I.	13,9	1,4	12,3	0,9
II.	18,9	0,6	14	1,2
III.	18,6	1,1	13,7	0,2
IV.	18,6	0,6	14,5	0,5
V.	15,4	2,1	13,4	1,6
VI.	15,1	0,6	14,3	0,4

Z tabulky 8 je patrné, že nejnižší výnos zrna i slámy byl u kontrolní nehnojené varianty.

Aplikace dřevního popela výrazněji ovlivnila varianty III. a IV., přičemž maximální výnos zrna (18,9 g) byl ve variantě II., kam se aplikovala pouze směs NPK.

Vyšších výnosů slámy bylo dosaženo u variant s příměsí popela ze spalování dřeva. Ostatní varianty byly bez průkazného rozdílu, i když vyšší aplikovaná dávka popela ukázala tendenci k nárůstu výnosu.

Tabulka 9. Obsahy vápníku, draslíku, fosforu (mg/kg) a dusíku (%) v zrnu pšenice jarní

Varianta	Ca		K		P		N	
	x	s	x	s	x	s	x	s
I.	1254,7	126,1	2200,0	115,1	5017,1	986,8	2,90	0,005
II.	1840,7	169	2549,2	543,2	4246,4	1005,1	3,13	0,033
III.	2038,3	196,7	2395,7	230,6	4329,3	236,6	3,12	0,019
IV.	2003,7	147,9	2192,8	161,8	4662,6	75,4	3,08	0,013
V.	1679	526,6	5807,7	536	4087,5	541,1	3,39	0,010
VI.	2040,1	382,6	2953,0	604,2	4612,3	143	3,24	0,007

V zrně byl ze sledovaných živin celkově nejvíce zastoupený fosfor. V první kontrolní variantě, kam nebyl aplikován popel, bylo fosforu průměrně nejvíce (5017 mg/kg).

U vápníku byla situace zcela opačná, protože v kontrolní variantě se ho vyskytovalo nejméně (1255 mg/kg). Aplikace dřevního popela zvyšovala množství vápníku více (varianta III. a IV.) než popel ze slámy (varianta V.), což je v souladu s obsahem vápníku v použitých popelech.

Použití popela obsah draslíku výrazněji neovlivňovalo s výjimkou varianty V., kde se v zrně vyskytovalo až 5808 mg K/kg. Na rozdíl od vápníku, kde jeho množství zvyšoval dřevní popel, množství draslíku v zrně pšenice zvyšovala aplikace popela ze slámy (varianta V. a VI.).

Obsah dusíku v zrně ovlivnil přidavek pozitivně zejména ve variantách V a VI, tzn. popel ze spalování slámy.

Tabulka 10. Obsahy vápníku, draslíku a fosforu (mg/kg) ve slámě pšenice jarní

Varianta	Ca		K		P	
	x	s	x	s	x	s
I.	710,1	217,3	9639,7	2282,6	817,1	617,8
II.	2358,2	454	18401,4	2409,7	506,6	167,1
III.	2164,5	916,9	17823,1	2975,8	774,2	200,8
IV.	1823,6	442,1	18361,8	2466,7	930,8	159,5
V.	1804,3	509,1	17327,6	2050	835,9	240,1
VI.	2149,6	758,5	18567,9	6250,3	614,9	165,7

Změny v obsahu draslíku nebyly statisticky významné, přesto byly ve variantách oproti kontrole značné rozdíly. Ve slámě byl zaznamenán nejvyšší výskyt draslíku ve variantách II., IV. a VI., přičemž ve variantě IV. a VI., kam se aplikovala dvojnásobná dávka popela, bylo draslíku oproti kontrolní variantě až dvojnásobné množství.

Nejméně byl ve slámě zastoupený vápník v první kontrolní variantě, po přidání popela byl patrný nárůst hodnot. Aplikace dřevního popela a popela ze slámy měla relativně stejný vliv na množství vápníku ve slámě.

Fosforu bylo nejvíce obsaženo ve variantě IV. (931 mg/kg), což bylo nejspíše způsobeno dvojnásobnou dávkou dřevního popela. Naopak popel ze slámy množství fosforu snižoval. Rozdíly v průměrných hodnotách fosforu nebyly statisticky významné, přesto byly ve variantách oproti kontrole značné rozdíly.

Tabulka 11. Přístupné obsahy vápníku, draslíku a fosforu (mg/kg) ve vzorcích půdy po sklizni pšenice jarní

Varianta	Ca		K		P	
	x	s	x	s	x	s
I.	2185,9	125,5	135,3	3,8	1395,2	182,7
II.	2355,3	34,1	173	3,9	1679	129,8
III.	2864,2	224,3	177,9	15,6	1849	170,2
IV.	3284,1	90,7	226,5	17,4	2532,7	195,6
V.	2318,3	119,1	236,3	34,6	1902,2	385,6
VI.	2325,2	42,4	268	2,4	2153,5	129,5

Změny obsahů přístupných živin byly patrné ve většině hodnocených variant.

Metodou Mehlich III bylo zjištěno nejméně přístupného draslíku v I. kontrolní variantě, po přidání popelů se jeho množství zvyšovalo. Nejvíce draslíku bylo zaznamenáno ve variantě VIII. (376 mg K/kg), což znamená, že jeho množství významně ovlivnila aplikace granulované směsi s popelem ze slámy. Značné zvýšení draslíku bylo zaznamenáno i u VII. varianty (296 mg K/kg), kam se aplikovala granulovaná směs s dřevním popelem.

Vápník se ve všech variantách pohyboval relativně na stejné úrovni až na variantu IV. (3284 mg Ca/kg), kam se aplikovala dvojnásobná dávka dřevního popela.

Změny v přístupných obsazích fosforu nebyly statisticky významné, přesto byly ve variantách oproti kontrole patrné rozdíly. Fosforu bylo nejvíce zjištěno ve variantě IV. (2533 mg P/kg), což bylo opět nejspíše zapříčiněno vlivem dvojnásobné dávky dřevního popela.

Tabulka 12. Hodnoty pH půdy a obsah minerálního dusíku v půdě

Varianta	pH		Nmin	
	x	s	x	s
I.	5,7	0,1	52,7	24,3
II.	5,5	0	119,4	13,2
III.	6,5	0,1	82,8	9,5
IV.	7,0	0	75,9	15,4
V.	5,5	0	122,9	35,2
VI.	5,7	0,1	106,7	29,7

Z tabulky 9 je patrné, že průměrné pH půdy se ve IV. variantě zvýšilo až na hodnotu 7,0, tzn. cca o 1,5 jednotky oproti kontrole. Lze předpokládat, že pH se zvýšilo vlivem dvojnásobné dávky dřevního popela, který je dle rozborů silně alkalický. V porovnání s variantou III., kam se aplikovalo poloviční množství dřevního popela, je rozdíl hodnoty pH pouze o 0,5 jednotky. Přídavek popela ze slámy hodnotu pH půdy nezměnil.

Obsah minerálního dusíku v půdě byl v obohacených variantách průměrně vyšší, přičemž oproti nehnojené kontrole se obsah minerálního dusíku zvýšil až dvojnásobně. Popel ze dřeva ve variantách III. a IV. ovlivnil obsah dusíku nejméně.

Obrázek 2 a 3. Rostliny pšenice jarní ve fázi kvetení a před sklizní



Na obrázku 2 vidíme všech 6 sledovaných variant. Nejvyšší vzrůst v tomto případě byl patrný u I. varianty, což byla nehnojená kontrola. Varianty II., III., IV., V. a VI. se vyznačovaly relativně podobným růstem. I přesto, že např. u varianty IV. a VI. byla aplikovaná dvojnásobná dávka popela, na růst to nemělo významný vliv.

Na Obrázku 3 můžeme pozorovat nejvyšší vzrůst u variant I, ale z výnosové tabulky je patrné, že pšenice ve variantě I byla výnosově nejslabší.

8.4. Polní experimenty

K ověření chování popela v reálných podmínkách byly založeny dva experimenty na pokusné stanici v Červeném Újezdu a to s ozimou pšenicí a cukrovkou. Charakteristika stanoviště je uvedena v tab. 12.

Tabulka 12. Základní charakteristika pokusného stanoviště

Stanoviště	Červený Újezd
Lokalizace	50°4'22"N, 14°10'19"E
Výrobní oblast.....	ŘVO
Nadmořská výška (m n. m.).....	410
Průměrná roční teplota (°C).....	7,7
Průměrné roční srážky (mm)	493
Půdní typ	hnědozem
Půdní druh	hlinitá
pH (CaCl ₂).....	6,5
Cox (%).....	1,7
KVK (mmol.kg ⁻¹).....	145
P _{přístupný} (mg/kg).....	100
K _{přístupný} (mg/kg).....	80
Mg _{přístupný} (mg/kg)	110
Ca _{přístupný} (mg/kg)	3600

8.4.1 Pšenice ozimá

Tabulka 13. Schéma pokusu s pšenicí ozimou

Varianta		Dávka popela
I	Kontrola	0
II	Popel - štěpka	1,7 t/ha
III	Popel - štěpka	4,3 t/ha
IV	Popel - sláma	0,85 t/ha
V	Popel - sláma	2,15 t/ha

Odlišné dávky byly zvoleny dle rozdílného obsahu K v obou druzích popela (tab. 13). Vyšší obsah draslíku v popelu ze slámy, ve variantách IV a V znamenal nižší aplikační dávku oproti variantám s dřevěným popelem z důvodu sjednocení dodaného množství draslíku oběma popely do půdy. Všechny varianty, včetně kontrolní byly hnojeny jednotnou dávkou 120 kg N/ha, ve formě ledku amonného s vápencem, další hnojiva nebyla aplikována. Popel byl aplikován ve formě prášku do půdy při předseťové přípravě.

Tabulka 14. Výnos, hmotnost tisíce semen (HTS) a objemová hmotnost zrna ozimé pšenice

Varianta	Výnos (t/ha)		HTS (g)		Objemová hmotnost zrna (g/dm ³)	
	x	s	x	s	x	s
I	4,94	0,01	44,9	0,1	768,9	0,3
II	5,85	0,01	48,7	0,1	762,8	0,4
III	5,93	0,05	46,4	0,1	772,3	0,2
IV	5,44	0,01	47,4	0,2	776,5	0,3
V	5,15	0,08	49,1	0,1	768,8	0,3

Výnos pšenice ozimé i hmotnost tisíce semen byl jednoznačně pozitivně ovlivněn aplikací popela do půdy (tab. 14). Vyšší dávka popela neznamenal trend změny výnosu. Objemová hmotnost zrna, jako jeden z ukazatelů výtěžnosti mouky při mlýnském zpracování, nebyla příměsí popelů v půdě významněji ovlivněna.

Tabulka 15. Obsahy živin v zrnu pšenice ozimé

Varianta	K (mg/kg)		Ca (mg/kg)		P (mg/kg)		N (%)	
	x	s	x	s	x	s	x	s
I	3118	185	219	8	2797	479	2,187	0,083
II	3156	141	230	13	3006	245	2,142	0,063
III	3246	197	212	7	2410	209	2,175	0,031
IV	3461	627	234	22	2631	241	2,243	0,047
V	3177	149	214	9	2870	455	2,236	0,058

Obsahy živin v pšenici ozimé se ve většině případů v obohacených variantách zvýšily, zejména u mobilního draslíku (tab. 15). Nejvyšší nárůst obsahu živin, s výjimkou fosforu, byl zaznamenán u varianty s nižší dávkou popele ze spalování slámy. Fosfor ovlivnila nejprůznivěji nižší testovaná dávka popele ze spalování dřevní štěpky.

Obrázek 4, 5. Pokusné pozemky s ozimou pšenicí na stanici v Červeném Újezdě



8.4.2 Cukrová řepa

Tabulka 16. Schéma pokusu s cukrovou řepou

Varianta		Dávka popela
I	Kontrola	0
II	Popel - štěpka	4,3 t/ha
III	Popel - sláma	2,15 t/ha

Pokus s cukrovou řepou byl založen pouze s vyšší dávkou popela s ohledem na vysokou náročnost rostlin na draslík (tab. 16). Popel byl aplikován při předseťové přípravě na jaře. Všechny varianty, včetně kontrolní byly hnojeny jednotnou dávkou 120 kg N/ha, ve formě ledku amonného s vápencem, další hnojiva nebyla aplikována.

Tabulka 17. Výnos bulv, chrástu a cukernatost cukrové řepy

Varianta	Výnos bulv t.ha ⁻¹		Výnos chrástu t.ha ⁻¹		Cukernatost %	
	x	s	x	s	x	s
I	81,80	0,25	29,41	0,75	18,70	0,45
II	81,88	0,32	27,84	0,22	18,72	0,34
III	86,13	0,63	30,53	0,47	18,73	0,16

Výnos a kvalitativní parametry cukrové řepy pozitivně ovlivnila zejména aplikace popela ze slámy (tab. 17). Varianta ošetřená popelem ze spalování dřevní štěpky prokázala srovnatelné výsledky s variantou kontrolní.

Tabulka 18. Obsahy živin v bulvách cukrové řepy

Varianta	K (mg/kg)		Ca (mg/kg)		P (mg/kg)		N (%)	
	x	s	x	s	x	s	x	s
I	4888	325	615	27	676	25	0,412	0,029
II	4902	116	582	19	649	45	0,393	0,036
III	5374	1002	596	84	578	27	0,464	0,041

Také v tomto případě se potvrdilo, že aplikace popelů ovlivňuje zejména přístupnost draslíku, jehož obsahy se v bulvách cukrovky mírně zvýšily (tab. 18). Obsahy ostatních živin mírně poklesly.

Tabulka 19. Vybrané charakteristiky cukrové řepy

Varianta	Alfa - amino-N mmol.100g ⁻¹	Výnos polar. cukru t.ha ⁻¹	Teoretická výtěžnost %	Výnos bílého cukru t.ha ⁻¹	Výnos bulv přepočtený na 16 % cukernatost t.ha ⁻¹
I	1,01	15,30	17,06	13,96	98,42
II	1,07	16,13	17,07	14,70	103,79
III	1,14	16,47	17,06	15,02	105,97

I další sledované charakteristiky cukrové řepy potvrdily kladné působení popela ze slámy (tab. 19) a jeho výraznější účinek ve srovnání s popelem ze spalování dřevní štěpky. Celkově je možno konstatovat, že aplikace popelů neprokázala negativní reakci a to jak v případě vzcházení a růstu rostlin, tak i při hodnocení kvalitativních parametrů bulv cukrovky.

Obrázek 6. Pokusné pozemky s cukrovou řepou na stanici v Červeném Újezdě



9. Legislativa ve světě a v ČR

Využití popelů ze spalování biomasy nemělo v naší legislativě oporu, ale díky nové vyhlášce č. 131/2014, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, je možné popele ze samostatného spalování biomasy využívat na zemědělské půdě, pokud nebudou překročeny limitní hodnoty rizikových prvků a látek (tabulka 20). Maximální aplikační dávka popela ze samostatného spalování biomasy je stanovena na 2 t/ha za 3 roky, přičemž v témže roce nesmí dojít k souběžnému použití popela a upravených kalů nebo sedimentů.

Tabulka 20. Limitní hodnoty rizikových prvků a látek v popelech ze samostatného spalování biomasy (mg/kg sušiny) dle vyhlášky č. 131/2014

Cd	Pb	Hg	As	Cr	PAU⁴⁾
5	50	0,5	20	50	20

⁴⁾ PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky (suma antracenu, benzo(a)antracenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(k)fluoranthenu, benzo(a)pyrenu, benzo(ghi)perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3 cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu)

Srovnáme-li obsahy rizikových prvků a látek získaných ze vzorků odebraných ve spalovnách ČR s limitními hodnotami v nové vyhlášce, můžeme konstatovat, že by legislativě nevyhověly pouze některé úletové popele, ale je nutné dodat, že se jedná o spalovny s nesprávně řízeným spalovacím procesem nebo kontaminovanou biomasou. Nízké spalovací teploty nebo nedostatek spalovacího média vede k vysokému nedopalu paliva a možnému výskytu rizikových látek, např. polycyklických aromatických uhlovodíků.

Porovnáním legislativy platné v ČR s předpisy vybraných států Evropy a USA pro použití popela (popř. půdní pomocné látky – Slovensko) na zemědělské nebo lesní půdě zjistíme, že nová česká norma veskrze zapadá do evropské legislativy v oblasti použití těchto materiálu v zemědělství (tab. 21). Limity pro obsah chromu, rtuti a olova jsou sice přísnější v porovnání s ostatními uvedenými státy, ale vzhledem k faktu, že pro Českou republiku je aplikace popelů na půdu nová zkušenost, je, dle našeho názoru, lepší postupovat dle tvrdší normy, a případně že se aplikace popela v praxi osvědčí a nebude zjištěno jeho negativní působení na půdu i rostliny, bude možné tyto limity upravit.

Tabulka 21. Limitní obsahy rizikových prvků pro použití hnojiva (popele) na zemědělskou a lesní půdu ve vybraných státech Evropy a v USA (mg/kg)

	ČR	Slovensko ¹⁾	Rakousko	Dánsko	Finsko		Švédsko ²⁾	USA ²⁾
	zem.	zem.	zem.	zem./lesy	zem.	lesy	lesy	
As	20	10	20		25	30	30	41
B							800	
Cd	5	2	8	5/15	1,5	17,5	30	39
Cr	50	100	250	100	300	300	100	3000
Cu		200	250		600	700	400	1500
Hg	0,5	1		0,8	1	1	3	17
Ni		50	100	30/60	100	150	70	420
Pb	50	100	100	120	100	150	300	300
Se		5						100
V			100				70	
Zn		400	1500		1500	4500	7000	2800

¹⁾ půdní pomocná látka, ²⁾ bioodpady

III. Srovnání „novosti postupů“

V předkládané metodice jsou uvedeny nové, vlastními experimenty podložené, poznatky o využití popelů ze spalování biomasy na zemědělských půdách České republiky.

Metodika hodnotí výsledky uskutečněných pokusů se zemědělskými plodinami na půdách ČR, kam byly aplikovány popele z biomasy v různých dávkách a formách. Byly testovány popele ze spalování dřevní štěpky i slámy a byly jednoznačně vymezeny jejich shodné i odlišné vlastnosti.

Díky nové národní legislativě definující parametry popelů vhodných k aplikaci na zemědělskou půdu byly obsahy sledovaných rizikových prvků a látek v popelech porovnány s výsledky získanými systematickým monitoringem popelů ze spaloven biomasy v ČR a také se světovou legislativou této oblasti a bylo konstatováno, že problematické mohou být pouze úletové popele a to za předpokladu, že popel obsahuje vysoký podíl nespálené organické hmoty.

Z pohledu zpracování problematiky v rámci území České republiky je obsah metodiky nový a původní.

IV. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika je vhodným zdrojem informací pro producenty popelů, kterým nová vyhláška sníží náklady, které byli předtím nuceni vynakládat na skládkování a seznámí je s novými možnostmi uplatnění těchto materiálů i s parametry popelů vznikajících spalováním odlišných druhů biomasy.

Zemědělcům dává přehled o hnojivém potenciálu zmiňovaných popelů a současně o míře úspor minerálních hnojiv, které je možno nahradit aplikací popelů na zemědělskou půdu.

V. Ekonomické aspekty

V této části metodiky jsme se pokusili nastínit míru úspor pro provozovatele spaloven biomasy i pro zemědělce poté, co vešla v platnost nová vyhláška č. 131/2014, díky níž je nyní možné aplikovat popel ze samostatného spalování biomasy na zemědělskou půdu.

Provozovatelům spaloven tím odpadají náklady na skládkování, což představuje u modelové spalovny s roční produkcí 100 tun popela finanční úlevu přibližně 110 tis. Kč/rok (cena za uložení tuny odpadu cca 600 Kč + poplatek 500 Kč za uložení odpadu dle zákona 185/2001). Při roční produkci cca 150 tis. tun popela v České republice by ušetřené náklady na skládkování činily 165 mil. Kč.

Tabulka 22. Odběrový normativ makroživin sledovanými plodinami (kg/produkce)

	N	P	K	Ca	Mg
jílek vytrvalý (t)	21	2,9	18,3	/	1,3
pšenice jarní (t zrna)	26	5,3	20	4,3	2,4
cukrová řepa (t bulev)	4,4	0,7	4,7	1	0,8
pšenice ozimá (t zrna)	25	5	20	/	2,4

Zdroj: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/html/

Průměrný výnos jílku vytrvalého je 18 tun sušiny/ha, pšenice jarní i ozimé cca 6 t/ha, cukrová řepa výnos bulev 50 t/ha.

Tabulka 23. Průměrný odběr živin sledovanými plodinami dle průměrného výnosu na hektar (kg/ha)

	N	P	K	Ca	Mg
jílek vytrvalý	378	52,2	329,4		23,4
pšenice jarní	156	31,8	120	25,8	14,4
cukrová řepa	220	35	235	50	40
pšenice ozimá	150	30	120		14,4

Tabulka 24. Průměrné množství živin (kg) dodané ve 2 tunách popela z biomasy (Tlustoš et al., 2012)

	P	K	Ca	Mg
popel - štěpka	32,8	142,8	424	39,6
popel - sláma	35,8	515	207	32,4

Dle nároků jednotlivých plodin vidíme, že kromě jílku vytrvalého, by byly zcela pokryty živinové nároky testovaných plodin. Kvůli vyšší potřebě draslíku u cukrovky a jílku by bylo vhodné k těmto plodinám použít popel ze spalování slámy, k pšenici by byl dostačující i popel ze spalování dřevní štěpky. Nároky plodin na vápník oba popele výrazně převyšují a navíc slouží pro úpravu půdní reakce, čímž se sníží náklady na aplikaci vápence. Obsah hořčíku v popelech by byl dostatečný i pro cukrovku, která je z uvedených plodin na obsah hořčíku nejnáročnější.

Z výše uvedeného vyplývá, že při použití popelů namísto konvenčního minerálního hnojení mohou zemědělci ušetřit hnojiva za celý rok k jedné plodině, při pěstování méně náročných plodin by dávka živin dodaná ve 2 tunách popela vystačila částečně i pro plodinu pěstovanou v roce následujícím. Spotřeba hnojiv v zemědělství za rok se v ČR pohybuje na úrovni 17 kg fosforečných hnojiv; 10,6 kg draselných hnojiv a 111,5 kg vápenatých hnojiv/ha obhospodařované zemědělské půdy. V roce 2014 bylo v České republice oseto 835 941 ha zemědělské půdy pšenicí, 62 959 ha cukrovou řepou a 452 427 ha pícninami, z čehož jílkem vytrvalým cca 35 tis. ha (www.czso.cz). Pokud počítáme s produkcí popela z biomasy na úrovni 150 tisíc tun

v České republice, mohli bychom při dávce 2 tuny/ha pohnojit přibližně 75 tis. hektarů zemědělské půdy. Při současných cenách minerálních hnojiv: 11 500 Kč za tunu granulovaného trojitého superfosfátu (45 % P_2O_5), 10 500 Kč za tunu granulované draselné soli (60 % K_2O), 660 Kč za tunu mletého dolomitického vápence (45 % CaO , 3 % MgO) (www.agronormativy.cz) by byla teoretická finanční úspora za předpokladu hnojení popelem při pěstování pšenice v ČR cca 58,8 mil. Kč/rok, cukrové řepy 48,7 mil. Kč a jílku vytrvalého 27,2 mil. Kč. Tyto částky by platily za předpokladu, že živiny obsažené v popelu jsou ve formě 100 % přijatelné pro rostliny, my můžeme počítat ale pouze přibližně s 60 % uvolnitelností, a proto i kalkulace úspor musí být o stejný díl ponížena. Náklady na hnojení dusíkem zůstávají v plné výši, neboť zastoupení dusíku v popelech je minimální.

VI. Závěr

Dle výsledků realizovaných experimentů můžeme konstatovat, že aplikace popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu, kterou umožnila nová vyhláška, je žádoucí z hlediska zhodnocení živin a úpravy hodnoty pH půdy, ale i z hlediska ekonomického.

Výnosové i kvalitativní parametry u vybraných testovaných rostlin byly po aplikaci popelů ve srovnání s kontrolní variantou prokazatelně lepší. Kromě klasické práškové formy popelů jsme zkoušeli aplikovat i popelové „čočky“, které lze obohatit o rozličná aditiva, dle konkrétní potřeby rostlin i půdy, a navíc velikostně vyhovují standartním rozmetadlům. Tato úprava výrazně zvýší rovnoměrnost aplikace a eliminuje prašnost aplikovaného materiálu.

Ekonomická rozvaha nám navíc ukázala potenciální výši úspor jak pro producenty popelů, tak pro zemědělce. Doufáme, že významné částky, které jsme se snažili nastínit, povedou k většímu zájmu o využití popelů ze spalování biomasy v zemědělství. Věříme ale také, že popele budou využívány zcela v souladu s platnou legislativou.

VII. Seznam použité související literatury

- Arshad, M.A., Soon, Y.K., Azooz, R.H., Lupwayi, N.Z., Chang, S.X. 2012. Soil and crop response to wood ash and lime application in acidic soils. *Agronomy Journal*. 104 (3). 715–721.
- Atwell, B.J., Kriedemann, P.E., Turnbull, C.G.N. 1999. *Plants in action*. Macmillan Education Australia Pty Ltd., Melbourne, Australia.
- Bougnom, B.P., Mair, J., Etoa, F.X., Insam, H. 2009. Composts with wood ash addition: A risk or a chance for ameliorating acid tropical soils? *Geoderma*. 153 (3-4). 402-407.
- Butkuvienė, E. 2005. Wood ash use for plants fertilization. In: *Rural Development*, Lithuanian University of Agriculture, Litva. p. 15-17.
- Campbell, A.G. 1990. Recycling and disposing of wood ash. *TAPPI Journal*. 73. 141-146.
- Demeyer, A., Voundi Nkana, J.C., Verloo, M.G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. *Bioresource Technology*. 77 (3). 287–295.

- Etiegni, L., Campbell, A.G. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology*. 37 (2). 173-178.
- Ferreiro, A., Merino, A., Díaz, N., Pineiro, J. 2011. Improving the effectiveness of wood – ash fertilization in mixed mountain pastures. *Grass and Forage Science*. 66 (3). 337-350.
- Gomez-Rey, M.X., Madeira, M., Coutinho, J. 2012. Wood ash effects on nutrient dynamics and soil properties under Mediterranean climate. *Annals of Forest Science*. 69 (5). 569-579.
- Gryndler, M. 2013. [Biologie půdních mikroorganismů. Univerzita J.E.Purkyně v Ústí nad Labem.](http://biology.ujep.cz/vyuka/file.php/1/opory_2014/Opory_Biologie_pudnich_mikroorganismu.pdf)
http://biology.ujep.cz/vyuka/file.php/1/opory_2014/Opory_Biologie_pudnich_mikroorganismu.pdf
- Hasler, P., Candinas, T., Nussbaumer, T. 1998. Utilization of ashes from the combustion of hay, miscanthus, hemp, straw and wood as fertilizer . In: *Biomass for energy and industry, 10th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry*, Wurzburg, Německo, 8. – 11. června 1998. p. 192-195.
- Izquierdo, M., Querol, X. 2012. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview. *International Journal of Coal Geology*. 94. 56-66.
- James, A.K., Thring, R.W., Helle, S., Ghuman, H.S. 2012. Ash management review-applications of biomass bottom ash. *Energies*. 5 (10). 3856-3873.
- Koivula, N., Räikkönen, T., Urpilainen, S., Ranta, J., Hänninen, K. 2004. Ash in composting of source-separated catering waste. *Bioresource Technology*. 93 (3). 291-299.
- Kuba, T., Tschöll, A., Partl, C., Meyer, K., Insam, H. 2008. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127 (1-2), 43-49.
- Kuokkanen, M., Poykio, R., Kuokkanen, T., Nurmesniemi, H. 2009. Wood ash—A potential forest fertilizer. In: Paukkeri, A., Ylä-Mella, J., Pongrácz, E., *Energy research at the University of Oulu*. Kalevaprint, Oulu, Finsko. p. 89–93.
- Kurola, J.M., Arnold, M., Kontro, M.H., Talves, M., Romantschuk, M. 2011. Wood ash for application in municipal biowaste composting. *Bioresource Technology*. 102 (8). 5214-5220.
- Loo, S., Koppejan, J. 2007. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, London, 442 p. ISBN 978-1-84407-249-1.
- Ludwig, B., Rumpf, S., Mindrup, M., Meiwes, K.J., Khanna, P.K. 2002. Effects of lime and wood ash on soil-solution chemistry, soil chemistry and nutritional status of a pine stand in Northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 17 (3). 225-237.
- Moilanen, M., Hytonen, J., Leppala, M. 2012. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. *European Journal of Soil Science*. 63 (4). 467-475.
- Norstrom, S.H., Bylund, D., Vestin, J.L.K., Lundstrom, U.S. 2012. Initial effects of wood ash application to soil and soil solution chemistry in a small, boreal catchment. *Geoderma*. 187-188. 85-93.
- Obernberger, I., Supancic, K. 2009. Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants. *Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed.)*, Italy.
- Ohno, T. 1992. Neutralization of soil acidity and release of phosphorus and potassium by wood ash. *Journal of Environmental Quality*. 21 (3). 433-438.
- Pan, H., Eberhardt, T.L. 2011. Characterization of fly ash from the gasification of wood and assessment for its application as a soil amendment. *Bioresources* 6 (4), 3987-4004.
- Park, B.B., Yanai, R.D., Sahm, J.M., Ballard, B.D., Abrahamson, L.P. 2004. Wood ash effects on soil solution and nutrient budgets in a willow bioenergy plantation. *Water, Air and Soil Pollution*. 159. 209–224.
- Park, N.D., Rutherford, P.M., Thring, R.W., Helle, S.S. 2012. Wood pellet fly ash and bottom ash as an effective liming agent and nutrient source for rye grass (*Lolium perenne* L.) and oats (*Avena sativa*). *Chemosphere*. 86 (4). 427–432.
- Perucci, P., Monaci, E., Onofri, A., Vischetti, C., Casucci, C. 2008. Changes in physico-chemical and biochemical parameters of soil following addition of wood ash: a field experiment. *Eur J Agron*, 28, 155 – 161.
- Poschenrieder, C., B. Gunse, I. Corrales & J. Barcelo (2008) A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*, 400,356-368.

- Risse, M., Harris, G. 2011. [Soil acidity and liming internet inservice training website: best management practices for wood ash used as an agricultural soil amendment.](http://hubcap.clemson.edu/~blpprt/bestwoodash.html) <http://hubcap.clemson.edu/~blpprt/bestwoodash.html>
- Rosenfeld, P., Grey, M., Suffet, M. 2004. Compost odor control using high carbon wood ash. *Water Science and Technology*. 49 (9). 171-178.
- Saarsalmi, A., Levula, T. 2007. Wood ash application and liming: effects on soil chemical properties and growth of Scots pine transplants. *Baltic Forestry*. 13 (2). 149-157.
- Saarsalmi, A., Malkonen, E., Kukkola, M. 2004. Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 19 (3). 217-233.
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Arola, M. 2010. Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. *Plant and Soil*. 331 (1). 329-340.
- Steenari, B.M., Lidqvist, O. 1997. Stabilisation of biofuel ashes for recycling to forest soil. *Biomass and Bioenergy*. 13 (1). 39-50.
- Tlustoš, P. a kol. 2012. Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy. ČZU v Praze 22 s. ISBN 978-80-213-2327-8.
- Tulonen, T., Arvola, L., Strommer, R. 2012. Cadmium release from afforested peatlands and accumulation in an aquatic ecosystem after experimental wood ash treatment. *European Journal of Forest Research*. 131 (5). 1529-1536.
- Uckert, G., Mette, R., Sattelmacher, B. 2001. Utilisation of boiler ash from biomass heating plants as fertilizer substitut. In: Horst, W., Schenk, M.K., editors, *Plant nutrition—Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA. str. 992-993.
- Ulery, A.L., Graham, R.C., Amrhein, C. 1993. Wood-ash composition and soil-pH following intense burning. *Soil Science*. 156 (5). 358-364.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, Ch.G. 2013. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*. 105. 40-76.
- Vyhláška č. 131/2014.
- Zhang, F.S., Yamasaki, S., Nanzyo, M. 2002. Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect: Contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals. *Science of the Total Environment*. 284 (1-3). 215-225.

VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice

- Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. [Popel z biomasy – přehled českých spaloven a výsledků sledování chemických složení popela.](http://www.drevnypopul.sk/admin/uploads/ZaverecnaKonferencia/Hanzlicek2.pdf) Konference dřevný popel, In-tech Slovakia, s.r.o., 30.11.-1.12.2011, Bratislava. <http://www.drevnypopul.sk/admin/uploads/ZaverecnaKonferencia/Hanzlicek2.pdf>
- Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. Popel ze spalování biomasy: odpad nebo hnojivo? Odpadové fórum, 2 (2011), 26-26. (Pozn.: Dotisk v čísle 4(2011), str. 3)
- Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. Využití popelovin ze spalování biomasy. Sborník přednášek XIX. Mezinárodního kongresu a výstavy Odpady – Luhačovice, 5.-8. září 2011, Luhačovice, 177-181, ISBN 978-80-904356-4-3.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J. 2012. Celkový obsah arsenu a kadmia v popelech ze spalování biomasy. Sborník z 18. Mezinárodní konference Racionální použití hnojiv, ČZU v Praze, Praha. s. 142-145. ISBN: 978-80-213-2331-5.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J. 2013. Effect of cadmium in wood ash on spring wheat vitality: pot experiment. In *Proceedings of the 16th International Conference on Heavy Metals in the Environment 23.9.2012, Rome, Italy*. Cedex A, France: E D P SCIENCES. p. 1-3.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J. 2013. Vliv aplikace popelů ze spalování biomasy na obsah přístupných živin v půdě a výnos jarní pšenice. Sborník z 19. Mezinárodní konference Racionální použití hnojiv, ČZU v Praze, Praha. s. 119-122. ISBN: 978-80-213-2416-9.

- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J. 2014. Wheat and soil response to wood fly ash application in contaminated soils. *Agronomy Journal*. 106. 995–1002.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Habart, J. 2011. Celkové obsahy živin v popelích ze spalování biomasy. Sborník ze 17. Mezinárodní konference Racionální použití hnojiv, ČZU v Praze, Praha. s. 107-111. ISBN: 978-80-213-2224-0.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Habart, J. 2011. Celkové obsahy živin v popelích ze spalování biomasy. Racionální použití hnojiv, Česká zemědělská univerzita v Praze, 107 – 111. ISBN 978-80-213-2224-0.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Habart, J. 2011. The content of risk elements and nutrients in ashes after biomass combustion and their potential use. *Proceedings of International Conference Soil, Plant and Food Interactions*, Brno, 324 – 329. ISBN 978-80-7375-534-8.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Perná, I., Hanzlíček, T. 2013. Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy (2. část – rizikové prvky, PAU). *Waste Forum*. 2. 67-75.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Perná, I., Hanzlíček, T., Habart, J. 2012. Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy (1. část – živiny). *Waste Forum*. 4. 204-209.
- Száková, J., Ochecová, P., Hanzlíček, T., Perná, I., Tlustoš, P. 2013. Variability of total and mobile element contents in ash derived from biomass combustion. *Chemical Papers*. 67 (11). 1376-1385.
- Száková, J., Ochecová, P., Hanzlíček, T., Perná, I., Tlustoš, P. 2012. Variability of total and mobile element contents in the ash after biomass combustion. *Book of Abstracts - European Symposium on Atomic Spectrometry 2012*, Tatranská Lomnica. p. 193.

IX. Dedikace

Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV č. QI102A207 „Využití popela ze spalování biomasy jako snadno aplikovatelného šetrného hnojiva, komplexní řešení přínosů a rizik“.

X. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Odborný oponent z oboru: Doc. Ing. Radim Vácha, Ph.D. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5 – Zbraslav.

Oponent ze státní správy: Ing. Michaela Budňáková, Ministerstvo zemědělství ČR, Odbor rostlinných komodit, Oddělení polních plodin, Těšnov 65/17, Praha 1, 110 00.