

Holzrasche: ein neuer Dünger für die Landwirtschaft

Alexandra Maltas und Sokrat Sinaj

Agroscope, Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB, 1260 Nyon

Auskünfte: Sokrat Sinaj, E-Mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Die Rostaschen der Zentrale Enerbois werden befeuchtet um deren Temperatur zu senken. Anschliessend werden sie mit einem Förderband zu einer Mulde transportiert, wo sie bis zu ihrer Entsorgung aufbewahrt werden. (Foto: Alexandra Maltas, 2013)

Einleitung

Die Verwendung von Holzrasche für die Kalkung der Böden und die Kaliumdüngung der Kulturen war früher ein übliches Verfahren, aber sie ist heute in der Schweiz nicht mehr gebräuchlich. Holzraschen sind auf der Liste

der zugelassenen Dünger gemäss Düngerverordnung (RS.916.171, 2011) nicht aufgeführt. Aber sie könnten bewilligt werden, sofern sie den geltenden Anforderungen an rezyklierte Dünger gemäss Anhang 2.6 der Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten, besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (=Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung = ChemRRV; RRV (RS.814.81, 2011)) entsprechen würden. Um die Qualität der Böden zu erhalten und die Risiken eines Eintrages unerwünschter Substanzen in die Nahrungskette zu verringern, werden in diesem Anhang die Maximalgehalte von sechs metallischen Spurenelementen aufgeführt, welche potenziell toxisch sind (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn).

Von Holzraschen werden diese Anforderungen selten erfüllt, und sie werden daher im Allgemeinen auf die Müllhalde gekippt, was jedoch einen beträchtlichen Verlust an wichtigen natürlichen Nährelementen darstellt und den Betreibern von Holzheizungen überdies Kosten verursacht. Um Umweltschäden zu ermitteln und zu vermeiden genügt es jedoch nicht, den Gesamtgehalt an metallischen Spurenelementen (MSE) zu bestimmen, da deren Mobilität, Bioverfügbarkeit und Toxizität vor allem von deren chemischer Form abhängt (Bruder-Hubscher *et al.* 2002). Die pro Hektare ausgebrachte Menge an MSE ist für das Risiko der Langzeitakkumulation von MSE in den Böden entscheidend. Der Nutzen und die Risiken der landwirtschaftlichen Anwendung dieser industriellen Nebenprodukte müssen daher genau untersucht und bestimmt werden. Das Pflanzenernährungsteam von Agroscope in Changins erforscht seit 2011 die agronomischen Auswirkungen des Einsatzes von Asche der Zentrale Enerbois. Die Forschungsziele sind: (i) die Charakterisierung der Zusammensetzung, der Mineralogie und der chemischen Form der Hauptelemente und der MSE in der Asche, (ii) die Identifizierung der Herkünfte der MSE und (iii) die Einschätzung der Auswirkungen der Asche auf die chemischen und biologischen Eigenschaften der Böden sowie auf den Ertrag und den Entzug von MSE durch die Kulturen. Der vorliegende Artikel fasst die Resultate einer Studie zu Punkt (iii) zusammen (Maltas und Sinaj 2013).

Material und Methoden

Probenahme und Analyse der Asche

Die Zentrale Enerbois (Rueyres, Waadt) ist die grösste Energieerzeugungsanlage auf der Basis von Biomasse in der Romandie. Sie produziert Energie durch die Verbrennung von Nebenprodukten (Borken, Rinden, Platten) der benachbarten Sägerei Zahnd. Beim verwendeten Holz handelt es sich um unbehandelte Nadelhölzer aus der Westschweiz. Die Zentrale erzeugt zwei Typen von Asche: Rostasche, welche durch Wasser abgekühlt wird, und Flugasche, welche stärker mit MSE belastet ist (Maltaš und Sinaj 2013). Bei der Probenahme stellte die Rostasche einen Drittel der Gesamtaschemenge dar, welche von der Zentrale produziert wird. Die in unserer Arbeit analysierten Asche ist Rostasche, die im März 2011 in den Wochen 10, 11, 12 und 13 entnommen wurde. Jede wöchentliche Probe war eine Mischprobe von fünf bis sieben täglichen Entnahmen von je ungefähr 500 Gramm. Die Ascheproben wurden anschliessend bei 40 °C getrocknet und bei einer Maschenweite von 2mm gesiebt. Ihre Gesamtgehalte an Makronährstoffen, Mikronährstoffen und MSE wurden bestimmt, nachdem sie in Fluorwasserstoff- und Perchlorsäuren in Lösung gebracht worden waren (www.lille.inra.fr/las). Mineralogische Analysen (Röntgendiffraktion und Rasterelektronenmikroskop) wurden bei der INRA-Nancy durchgeführt. Die Art der Makroelemente und MSE wurde durch sequenzielle Extraktionen gemäss der BCR Methode erhalten (Rauret *et al.* 2000).

Gewächshausversuch

Der in den Gewächshäusern von Agroscope in Changins durchgeführte Topfpflanzenversuch mit Sonnenblumen wurde am 11. Mai gesät und am 19. September 2012 geerntet. Sonnenblumen (Sorte San Lucas) wurden als Versuchspflanzen gewählt, weil diese Pflanzenart sehr hohe Ansprüche an die Kaliumernährung stellt. Jeder Topf enthielt 2 kg trockene Erde und eine Pflanze. Der Boden im Topf wurde mit entmineralisiertem Wasser bei 70 % der Feldkapazität gehalten. Die Bodentemperatur wurde auf 20 bis 25 °C einreguliert. Es wurde ein toniger Boden (53,8 % Tongehalt, 12,4 % Sandgehalt) mit einem schwach saurer pH-Wert von 6,7 verwendet. Der gesamte Nährstoffgehalt dieses Bodens belief sich auf 3,4, 0,94, 19,8 und 12,4 g/kg TS für die Elemente N, P, K und Mg.

Es wurden vier Versuchsvarianten angesetzt: (i) «Kontrolle» keine Zugabe von Asche und Mineraldüngern, (ii) «Aschen», d.h. Kaliumgabe nur in Ascheform ohne Mineraldüngergabe, (iii) «NPMg-Aschen», d.h. Kaliumgabe in Ascheform und Zugabe von N, P, Mg als Mineraldünger, und schliesslich (iv) «NPMg-K», d.h. Zugabe von N, P, Mg

Zusammenfassung Die Verwendung von Holzasche in der Form eines Kaliumdüngers wurde bei Sonnenblumen geprüft. Der Versuch wurde mit Asche der Holzzentrale Enerbois (Waadt) in einem Gewächshaus von Agroscope in Changins durchgeführt. Diese Asche wies hohe Kalzium- und Kaliumgehalte auf, sie enthielt aber auch Spuren von metallischen Elementen, insbesondere von Kupfer, Zink und Nickel. Dieser Versuch hat belegt, dass das Kalium, welches in dieser Asche enthalten war, eine mit einem KCl-Dünger vergleichbare Düngungswirkung aufwies. Unter Bedingungen mit einem begrenzten Angebot an NPKMg führte diese Asche zu einem positiven Effekt auf die Biomasseproduktion und die Kaliumaufnahme der Sonnenblumen. Die Aufnahme von Ni und Zn nahm jedoch ab, wahrscheinlich als Folge des negativen Effektes der Kalkdüngung auf die Löslichkeit dieser Elemente. Unter Bedingungen, welche punkto NPKMg nicht limitierend waren, wurden dieselben Effekte auf die Biomasse und die Absorption von Ni und Zn beobachtet. Obwohl die Ni- und Cu-Gehalte über den in der Schweiz gegenwärtig zugelassenen Schwellenwerten für das Ausbringen von rezyklierten Düngern lagen, hat dieser Versuch gezeigt, dass es vor allem die Gehalte an Kalium sind, welche die Menge an auszubringender Asche begrenzen.

Tab. 1 | Totalgehalt der Rostasche von Enerbois an Makro- und Mikroelementen und der Holzaschen gemäss Literaturangaben. Die Prozentwerte in Klammern geben die Variationskoeffizienten an

	Aschen Enerbois	Literatur ¹
pH-H ₂ O	13,2 (1 %)	9 – 13,5
Makroelemente (g/kg TS)		
Kalzium (Ca)	281,3 (2 %)	109,4 – 317,4
Kalium (K)	67,4 (9 %)	24,0 – 41,3
Magnesium (Mg)	16,5 (5 %)	16,0 – 22,5
Phosphor (P)	9,2 (9 %)	5,0 – 14,0
Stickstoff (N)	0,07 (27 %)	0,3 – 0,9
Mikroelemente (mg/kg TS)		
Aluminium (Al)	17 300 (7 %)	13 000 – 23 650
Eisen (Fe)	12 175 (3 %)	3300 – 19 500
Mangan (Mn)	7550 (7 %)	3470 – 8160
Bor (B)	147 (12 %)	8 – 135
Chrom (Cr)	123 (17 %)	14 – 86
Vanadium (V)	22 (12 %)	–
Kobalt (Co)	9 (168 %)	4 – 10
Molybdän (Mo)	1,1 (7 %)	<5 – 114

¹Demeyer *et al.* 2001, Hébert und Breton 2008.

Tab. 2 | Maximal zulässige Gehalte an metallischen Spurenelementen (MSE) für rezyklierte Dünger, Gehalte der Rostaschen von Enerbois und Literaturangaben. Die Werte in Klammern geben den Variationskoeffizient an

	Zulässige Maximalgehalte ¹	Aschen Enerbois	Literatur ²
		mg/kg TS	
Zink (Zn)	400	178 (14 %)	700 – 924
Kupfer (Cu)	100	110 (21 %)	74 – 145
Nickel (Ni)	30	52 (7 %)	12 – 47
Blei (Pb)	120	21 (53 %)	<22 – 130
Cadmium (Cd)	1	<0,6	3 – 21
Quecksilber (Hg)	1	<0,02	<0,1

¹Gemäss Anhang 2.6, ch. 2.2.1 der Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (=ChemRRV).

²Demeyer *et al.* 2001, Hébert und Breton 2008.

und K als Mineraldünger. Jedes Verfahren wurde in dreifacher Wiederholung in einem randomisierten Blockdesign angelegt. Die Aschegaben wurden entsprechend den K-Bedürfnissen der Sonnenblumen berechnet (Sinaj *et al.* 2009). Die Dosis an K im Verfahren (iv) war gleich wie jene in den Verfahren mit Asche. Die andern mineralischen Nährelemente N, P und Mg wurden in gleicher Weise zugefügt gemäss Sinaj *et al.* (2009).

Die mineralischen Dünger und die Rostasche wurden dem Boden zugemischt, bevor die Töpfe damit abgefüllt wurden. Als mineralische Dünger wurden verwendet: Ammoniumnitrat (NH₄NO₃), Triple-Superphosphat [Ca(H₂PO₄)₂·H₂O], Magnesiumchlorid (MgCl₂), Kalium-

chlorid (KCl) und Baukalk (CaO). Zum Zeitpunkt der Ernte wurde die gesamte Trockensubstanz (Wurzeln, Blätter, Stängel, Körner) gemessen, und es wurden deren Gehalte an N, P, K, Mg, Zn, Cu und Ni bestimmt. Dazu wurde eine Trockenmineralisation und ein In-Lösung-Bringen durch Fluorwasserstoffsäure (www.bordeaux.inra.fr/usrave) vorgenommen.

Berechnung und statistische Analysen

Die Wirkungen der Aschezugaben unter begrenzenden Bedingungen (Verfahren «Kontrolle» im Vergleich zu «Aschen») sowie unter nicht begrenzenden Bedingungen bezüglich NPMgK (Verfahren «NPMg-K» gegenüber

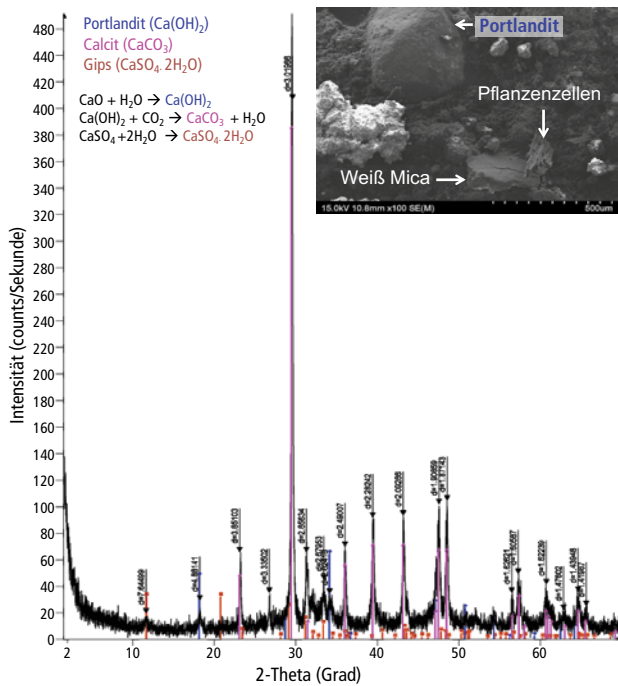


Abb. 1 | Mineralogie des Kalziums.

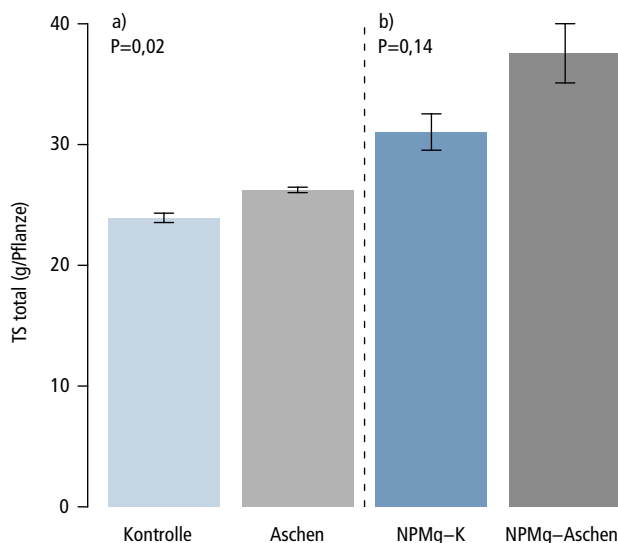


Abb. 2 | Gesamtmenge an Trockensubstanz (TS) von Sonnenblumen bei der Ernte unter Bedingungen a) limitierend und b) nicht limitierend in Bezug auf NPMgK. Die Irrtumswahrscheinlichkeit des T-Testes und der Standardfehler (vertikale Balken) sind eingetragen.

«NPMg-Aschen») wurden mit dem T-Test und dem Softwarepaket R 2.14.1 (R Development Core Team, 2011) untersucht.

Resultate und Diskussion

Eigenschaften der Asche von der Feuerungsanlage Enerbois

Die Asche von Enerbois weist einen sehr alkalischen pH-Wert auf, welcher in Bezug zu setzen ist mit ihrem hohen Gehalt an Ca und Mg (Tab. 1). Ca liegt vorwiegend (Abb. 1) als Karbonat [(Kalzit: CaCO_3)] und als Kalziumhydroxid [Portlandite: $\text{Ca}(\text{OH})_2$] vor, was wenig reaktiven Formen entspricht. Dies erklärt die wenig aggressive und langsamere Wirkung der Asche auf den pH-Wert der Böden im Vergleich zu jener des Baukalkes (CaO) (Maltas und Sinaj 2013).

Wie erwartet ist diese Asche eine wichtige K-Quelle und in geringerem Ausmass auch eine P- und Mg-Quelle (Tab.1). Diese Asche enthält auch eine grosse Zahl von Mikronährstoffen (insbesondere Al, Fe, Mn und B) sowie MSE wie Zn, Cu, Ni und Pb (Tab. 1 und 2). Diese MSE, welche in den Schweizerböden (Luster *et al.* 2006) und damit im Holz vorhanden sind, werden in der Asche bei der Verbrennung aufkonzentriert (Hébert und Breton 2008; Maltas und Sinaj 2013). Die MSE werden in der Flugasche stärker aufkonzentriert als in der Rostasche (Maltas und Sinaj 2013). Die Zentrale Enerbois trennt diese beiden Aschetypen, während sich jedoch die in der Literatur beschriebenen Ascheanalysen im Allgemeinen auf ein Gemisch dieser beiden Aschetypen beziehen. Entsprechend weist die Asche von Enerbois deutlich geringere Gehalte an Zn, Pb und Cd auf als was sich sonst in der Literatur findet (Tab. 2). Ihre Gehalte an Cu und Ni übersteigen dennoch die durch die ChemRRV vorgegebenen Schwellenwerte, was einer landwirtschaftlichen Verwendung dieser Asche im Wege steht (Tab. 2).

Wirkung der Asche auf die Biomasse von Sonnenblumen

Unter Bedingungen, die punkto NPMgK limitierend sind («Kontrolle» im Vergleich zu «Aschen») führt die Zugabe von Asche zu einer signifikanten Zunahme der Trockensubstanzproduktion (Abb. 2a). Dieselbe Tendenz wird bei nicht limitierenden Bedingungen bezüglich NPKgK (Abb. 2b) beobachtet. Ein positiver Effekt von Aschezugaben auf die TS-Produktion ist bei zahlreichen kultivierten Pflanzen wie Hafer, Winterweizen, Schwingel, Spinat, Erbse, Mais, Pappel und Soja (Demeyer *et al.* 2001) beobachtet worden. Dieser Effekt kann auf der Kalkungswirkung der Aschen im Boden und/oder der Zufuhr von Makro- und Mikronährstoffen durch die Aschen zugeschrieben werden.

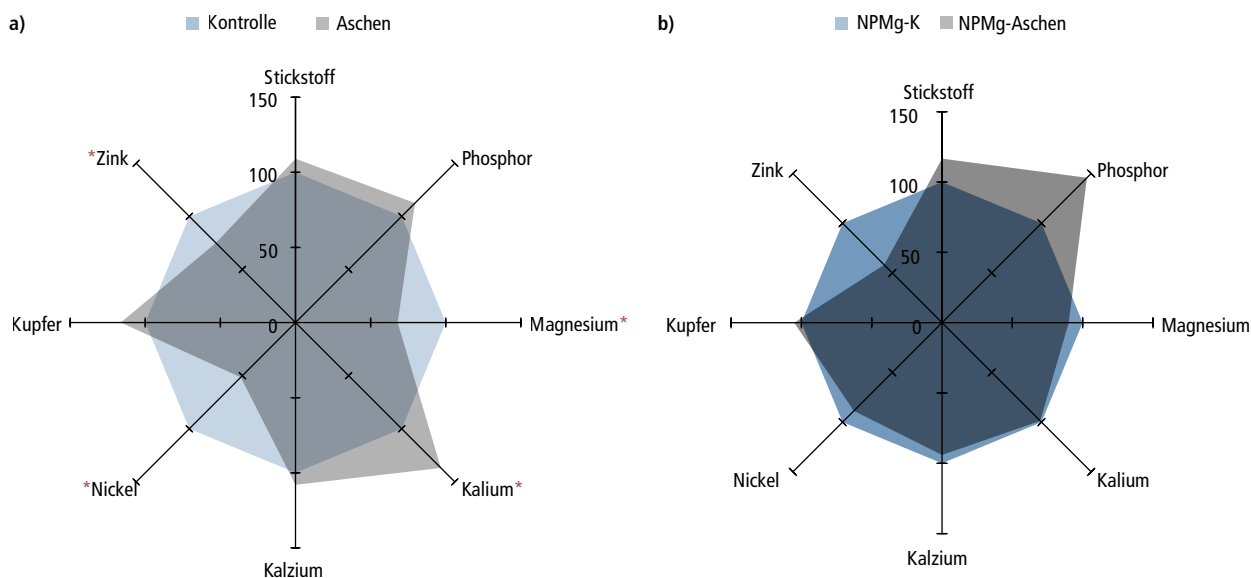


Abb. 3 | Aufnahme der Nährstoffe durch Sonnenblumen unter Bedingungen a) limitierend und b) nicht limitierend in Bezug auf NPMgK. Die Ergebnisse sind als Relativwerte im Vergleich zu Verfahren ohne Asche (Verfahren «Kontrolle» und NPMg-K in Abbildung a bzw. b). Die roten Sternchen geben signifikante Unterschiede zwischen den beiden Verfahren an, bei der 5% Schwelle des T-Testes.

Aufnahme von Makroelementen durch Sonnenblumen

Bei limitierenden Bedingungen bezüglich NPMgK ist die Aufnahme von K beim Vorhandensein von Asche signifikant höher («Aschen» gegenüber «Kontrolle», Abb. 3a). Dies zeigt, dass Asche Kalium in leicht durch die Pflanzen aufnehmbarer Form anbietet. In der Tat sind 36% bzw. 49% des gesamten Kaliums in der Asche in Wasser (Malta und Sinaj 2011) bzw. Essigsäure löslich (Abb. 4). Erich (1991) erwähnt eine gleiche K-Wirkung von Asche wie

jene der mineralischen K-Dünger. Unser Versuch bestätigt dieses Resultat, denn unter nicht limitierenden Bedingungen bezüglich NPMgK sind die von Sonnenblumen absorbierten K-Mengen vergleichbar, ob nun K aus der Asche oder aus dem KCl-Dünger stammt (Abb. 3b). Andererseits verbessert die Zugabe von Asche ($P > 0,05$) die Aufnahme von Stickstoff (N) und Phosphor (P) durch Sonnenblumen unter limitierenden (Abb. 3) und besonders unter nicht limitierenden Bedingungen bezüglich

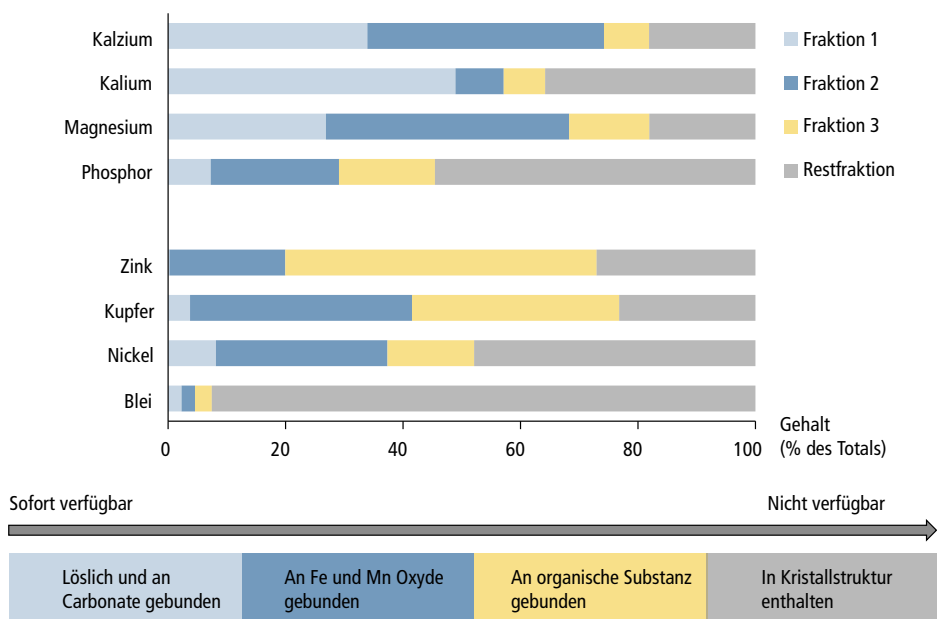


Abb. 4 | Artbildung der Makroelemente und der metallischen Spurenelemente.

Tab. 3 | Zulässige Maximalmengen an MSE für rezyklierte Dünger und mittlere Mengen, die auftreten bei der Zugabe von 25 t TS/ha eines landwirtschaftlichen Kompostes oder der Zugabe von 5 t TS/ha Rostasche von Enerbois

	Zugeführte Mengen (kg/ha in drei Jahren)		
	Maximal zulässig ¹	Aschen Enerbois	Landwirtschaftlicher Kompost ²
TS ³	25000	5000	25000
Zn	10	0,89	3,71
Cu	2,5	0,55	1,59
Ni	0,75	0,26	0,37
Pb	3	0,11	1,15
Cd	0,025	<0,002	<0,003
Hg	0,025	nd ⁴	nd ⁴

¹Abgeleitet aus dem Anhang 2.6 der Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (=ChemRRV).

²Selon Kupper und Fuchs (2007), schweizerische landwirtschaftliche Komposte enthalten im Mittel an Zn, Cu, Ni, Pb und Cd 148, 64, 15, 46 et 0,1 mg/kg TS.

³TS: Trockensubstanz.

⁴nd: nicht bestimmt, da die Gehalte der Dünger unterhalb der Nachweisgrenze lagen.

NPMgK (Abb. 3b). Die Aschen sind praktisch N-frei (Tab. 1). Dieser vorteilhafte Effekt auf die Entnahme von N ist wahrscheinlich mit dem positiven Effekt der Kalkung auf die Mineralisation der organischen Substanz im Boden verbunden (Maltas und Sinaj 2013). Die positive Wirkung der Asche auf die P-Aufnahme durch Sonnenblumen dürfte sich aus einem doppelten Effekt auf den austauschbaren P-Gehalt (Extraktion durch Ammoniumacetat EDTA (AAE)) des Bodens ergeben: (i) positiver Effekt der Kalkung auf die Verfügbarkeit von P in diesen schwach sauren Böden und (ii) ein Effekt als Folge Mengen von austauschbarem P durch den Eintrag von Asche (Abb. 4).

Unter begrenzenden Bedingungen bezüglich NPMgK nimmt die Mg-Aufnahme durch Sonnenblumen bei Vorhandensein von Asche signifikant ab (Abb. 3a), obwohl ein Mg-Eintrag durch die Asche erfolgt. Bei einer Kalkung wird generell eine Abnahme der Mg-Aufnahme durch die Pflanzen beobachtet, was dem Antagonismus zwischen Ca- und Mg-Aufnahme zugeschrieben wird (Marschner 2012, Halvin *et al.* 2005). In unserem Versuch konnte bei Aschezugaben kein signifikanter Effekt auf die Mengen an absorbiertem Ca beobachtet werden (Abb. 3). Ein Antagonismus zur Aufnahme von K scheint daher plausibler.

Aufnahme von MSE durch Sonnenblumen

Bei Anwesenheit von Asche war die Zn- und Ni-Aufnahme durch Sonnenblumen geringer. Dieser Effekt ist unter limitierenden Bedingungen bezüglich NPMgK (Abb. 3a) signifikant, hingegen nicht signifikant unter nicht limitierenden Bedingungen (Abb. 3b). Die reduzierte Zn- und Ni-Aufnahme bei Vorhandensein von Asche kann mit den tiefen austauschbaren Zn- und Ni-Gehalten (Extraktion durch AAE) in Verbindung gebracht

werden, welche bei Kalkung des Bodens beobachtet werden (Maltas et Sinaj 2013). Nimmt der pH-Wert des Bodens zu, so werden die MSE durch Eisen- und Aluminiumoxyde absorbiert (Havlin *et al.* 2005). Während Zn und Ni diesen pH-Effekt sehr stark zeigen, ist Cu davon wenig betroffen (Smith 1994). Weiter ist zu erwähnen, dass die Rostasche von Enerbois sehr geringe Mengen an leicht verfügbarem Zn, Cu, Ni und Pb mit sich bringt (0,2 bis 8 % des Totals; Abb. 4). Auch die in Québec durchgeführten Studien zum Ausbringen von Asche für landwirtschaftliche Zwecke berichten von keinen kurzfristigen durch MSE-Eintrag verursachten Problemen mit der Bodenqualität, dem Grundwasser und der Fauna (Hébert und Breton 2008). Hingegen bleibt langfristig das Problem der Toxizität der Schwermetalle bestehen. In den Aschen liegen 73 % des Cu, 73 % des Zn, 44 % des Ni und 5 % des Pb in Formen vor, die potenziell – wenn auch langsam – unter reduzierenden oder oxidierenden Bedingungen verfügbar werden (Abb. 4).

Langfristige Risiken der MSE

Nur mit der Definition von Maximalmengen an MSE, die dem Boden zugeführt werden (kg/ha), können Risiken einer Akkumulation bis zu toxischen Werten langfristig vermieden werden. Die Maximalmenge an rezykliertem Dünger, welche für Düngungszwecke bewilligt ist, wurde auf 25 t TS/ha festgelegt, wobei diese Menge in einer oder mehreren Gaben über insgesamt drei Jahre zu erfolgen hat (Anhang 2.6, ch 3.2.2 der ChemRRV). Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Gehalte (Tab. 2) erlaubt diese Menge an TS die eingetragenen Mengen an MSE unter den in Tabelle 3 erwähnten Schwellenniveaus zu halten. Auf der Basis der K-Gehalte der Rostaschen von Enerbois (Tab. 1) und des K-Bedarfes der Feldkulturen (Sinaj *et al.* 2009) sollte die nötige

Aschemenge zur K-Düngung einer Kultur 5 t TS/ha nicht übersteigen. Mit einer Maximalmenge an Asche von 5 t TS/ha, wobei diese Menge in einer oder mehreren Gaben über insgesamt drei Jahre zu erfolgen hat, sind die mit der Asche eingetragenen Mengen an MSE deutlich geringer als (i) die zugelassenen Maximalmengen in rezyklierten Düngern und (ii) als die eingebrachten Mengen durch einen klassischen landwirtschaftlichen Kompost, der mit der zugelassenen Maximaldosis von 25 t TS/ha in drei Jahren ausgebracht wird (Tab. 3). Diese Feststellung wirft die Frage auf, ob die Maximalgehalte für MSE, die momentan für Aschen gelten, sachdienlich sind. Eine Modifikation der Maximalgehalte in Abhängigkeit von der Menge an ausgebrachter TS würde erlauben, die zulässigen Maximalmengen an MSE zu respektieren, gleichzeitig könnte der Wert neuer natürliche Düngerquellen wie jener der Rostasche angehoben werden.

Diese Resultate weisen in dieselbe Richtung wie andere Studien, welche aufzeigen, dass Holzaschen, die gelegentlich in agronomischen Dosen zum Einsatz kommen, keine kurz- oder langfristigen Umweltrisiken dar-

stellen würden (Demeyer *et al.* 2001, Hébert et Breton 2008). Demeyer *et al.* (2001) betonen, dass schon allein die Bedürfnisse zur Bodenverbesserung oder zur K-Düngung im allgemeinen die Dosis der auszubringenden Asche begrenzen.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Rostasche der Zentrale Enerbois keine Risiken für die Böden und die Kulturen darstellen. Die Rostasche könnte als Kali-umdünger auf sauren Böden eingesetzt werden. Es wäre interessant die Forschung fortzusetzen, wobei die Auswirkungen dieser Asche auf neutrale und leicht alkalische Böden sowie auf die Felder zu untersuchen wäre. ■

Dank

Die Autoren sind der Unternehmung Romande Energie SA für die Co-Finanzierung dieser Studie zu Dank verpflichtet sowie Dr. M. P. Turpault, INRA Nancy, für die mineralogischen Analysen.

Literatur

- Bruder-Hubscher V., Lagarde F., Leroy M. J. F., Coughanowr C. & Enguehard F., 2002. Application of a sequential extraction procedure to study the release of elements from municipal solid waste incineration bottom ash. *Analytica Chimica acta* **451**, 285–295.
- 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**, 287–295.
- Erich M.S., 1991. Agronomic effectiveness of wood ash as a source of phosphorus and potassium. *Journal of Environmental Quality* **20**, 576–581.
- Halvin J. L., Beaton J. D., Tisdale S. L. & Nelson W. L., 2005. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 515 p.
- Hébert M. & B. Breton., 2008. Recyclage agricole des cendres de bois au Québec- Etat de la situation, impacts et bonnes pratiques agro-environnementales. *Agrosolutions* **19**, 18–33.
- Kupper T. & J. Fuchs., 2007. Compost et digestat en Suisse. Connaissance de l'environnement 743. Office fédérale de l'environnement, Berne. 124 p.
- Luster J., Zimmermann S., Zwicky C. N., Liernemann P. & Blaser P., 2006. Heavy metals in Swiss forest soils: modification of lithogenic and anthropogenic contents by pedogenetic processes, and implications for ecological risk assessment *Geological Society, London, Special Publications* **266**, 63–78.
- Maltas A. & Sinaj S., 2011. Intérêts agronomiques des cendres humides de la centrale Enerbois. Agroscope. 28 p.
- Maltas A. & Sinaj S., 2013. Effets des cendres de bois de la centrale Enerbois sur les propriétés du sol, le rendement des cultures et la qualité des récoltes. Agroscope. 63 p.
- Marschner P., 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press. 651 p.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R., & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Revue suisse d'Agriculture* **41** (1), 1–98.
- Smith S. R., 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-treated soils. I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. *Environmental Pollution* **85** (3), 321–327.
- Rauret G., Lopez-Sanchez J. F., Sahuquillo A. et al., 2000. Application of a modified BCR sequential extraction (three step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material (CMR 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *Journal of Environmental Monitoring* **2**, 228–233.
- RS.814.81. 2011. Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). 18 mai 2005 (état le 1^{er} juillet 2011).
- RS.814.201. 2011. Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux). 28 octobre 1998 (état le 1^{er} août 2011).
- RS.916.171. 2011. Ordonnance sur les engrais (OEng). 10 janvier 2001 (état le 1^{er} juillet 2011).

Riassunto**Le ceneri del legno: un nuovo fertilizzante per agricoltura Svizzera**

Questo articolo riassume i principali risultati di una prova svolta in serra allo scopo di verificare gli effetti delle ceneri provenienti dalla centrale a legno Enerbois e utilizzate come fertilizzante potassico sul girasole. Queste ceneri presentavano elevati tenori in Ca e in K, ma contenevano anche tracce metalliche, in particolare Cu, Zn e Ni. Questa prova ha evidenziato una disponibilità in potassio contenuto nelle ceneri equivalente a quella di KCl utilizzata come fertilizzante potassico di riferimento. In condizioni limitanti in NPKMg queste ceneri hanno ottenuto un effetto favorevole sulla biomassa del girasole e sull'assorbimento di K, mentre le quantità di Ni e Zn assorbite sono diminuite, presumibilmente a causa dell'effetto negativo sulla solubilità della calcinazione di questi elementi. In condizioni senza limitazioni in NPKMg sono state osservate le stesse tendenze sia sulla biomassa, sia sull'assorbimento di Ni e Zn. Questa prova ha mostrato che, malgrado i tenori in Ni e Cu si situino oltre le soglie attualmente autorizzate in Svizzera per lo spargimento di fertilizzanti da riciclaggio, siano soprattutto i tenori in K a limitare la quantità di cenere da spargere.

Summary**Wood ashes: a new fertilizer for Swiss agriculture**

The use of wood ashes as potash fertilizer was tested on sunflower. The greenhouse experiment was conducted in Changins and used wood ashes provided by the wood power station Enerbois (Vaud). These ashes contained high amounts of Ca and K but also trace elements, particularly Cu, Zn and Ni. Results of the trial highlighted an efficiency of K contained in these ashes equivalent to that of KCl used as reference potassic fertilizer. In NPKMg-limiting conditions, the wood ashes had a positive effect on the biomass of sunflower and the absorption of K, but they reduced the amount of absorbed Ni and Zn, probably because of the negative effect of liming on the solubility of these elements. In not-NPKMg-limiting conditions, the same trends were observed regarding the biomass and the absorption of Ni and Zn. This trial showed that despite Ni and Cu contents beyond the limits currently approved in Switzerland for recycling fertilizer, it is above all the K levels that limit the amount of ashes to be spread.

Key words: wood ashes, potassium, trace element, nutrient solubility, liming, Swiss legislation.