

Aus dem
Institut für Zuckerrübenforschung
Göttingen

Sven Fischer

**Einfluss einer Kalkung auf Phosphor und
Kalium in Lössböden und Zuckerrüben**

45/2016



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Einfluss einer Kalkung auf Phosphor und Kalium in Lössböden und Zuckerrüben





Einfluss einer Kalkung auf Phosphor und Kalium in Lössböden und Zuckerrüben

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät für Agrarwissenschaften

der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Sven Fischer

geboren in Hanau am Main

Göttingen, Juli 2015



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2015

D 7

1. Referent: Prof. Dr. Bernward Märländer

2. Korreferent: Prof. Dr. Klaus Dittert

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juli 2015

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9202-3

eISBN 978-3-7369-8202-4



Inhaltsverzeichnis

ARTIKELVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS.....	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XI
I. PROLOG.....	1
EINLEITUNG	1
<i>Bodenuntersuchung</i>	2
<i>Düngeberatung auf Basis der EUF-Methode</i>	3
AUFBAU DES EUF PROJEKTES UND SCHWERPUNKT DER VORLIEGENDEN ARBEIT (SVEN FISCHER UND HOLGER LEMME)	6
<i>Teilprojekt 1 – Laborinkubations- und Gewächshausversuche (Holger Lemme)</i>	7
<i>Teilprojekt 2 – Feldinkubations- und Felddüngungsversuche (Sven Fischer)</i>	8
AUFBAU DER ARBEIT.....	10
II. ARTIKEL 1 EFFECT OF LIMING CENTRAL EUROPEAN LOESS SOILS ON SOIL EXTRACTABLE PHOSPHORUS AND POTASSIUM AS DETERMINED BY ELECTRO- ULTRAFILTRATION (EUF).....	11
ABSTRACT	11
INTRODUCTION	11
MATERIAL AND METHODS	13
<i>Field experiments</i>	13
<i>Soil analysis</i>	14
<i>Statistical analysis</i>	16
RESULTS AND DISCUSSION	16
<i>Calcium</i>	16
<i>Phosphorus</i>	18
<i>Potassium</i>	20
CONCLUSION	22
REFERENCES.....	22
III. ARTIKEL 2 MULTIVARIATE APPROACH TO PREDICT THE EFFECT OF LIMING ON EXTRACTABLE PHOSPHORUS AND POTASSIUM ON LOESS SOILS WITH PH CLOSE TO 7. 27	
ABSTRACT	27
1. INTRODUCTION	28
2. MATERIAL AND METHODS.....	30
2.1. <i>Data base</i>	30
2.2. <i>Statistical analysis</i>	30
3. RESULTS	33



Inhalt

3.1. Classification of trial sites.....	33
3.2. Analysis of variance	36
4. DISCUSSION	39
4.1. Classification of trial sites.....	39
4.2. Effects of liming on soil calcium, pH, potassium and phosphorus	42
5. CONCLUSIONS	45
ACKNOWLEDGEMENTS	45
REFERENCES.....	46
IV. ARTIKEL 3 EINFLUSS EINER KALKUNG AUF EUF EXTRAHIERBARES PHOSPHOR UND KALIUM IM BODEN SOWIE AUF NÄHRSTOFFENTZUG, ERTRAG UND QUALITÄT VON ZUCKERRÜBEN BEI DIFFERENZIIERTER KALIUMDÜNGUNG IN FELDVERSUCHEN	51
KURZFASSUNG.....	51
EINLEITUNG.....	52
MATERIAL UND METHODEN	53
<i>Feldversuche</i>	53
<i>Versuchsdurchführung Phase 1</i>	54
<i>Bodenproben und -untersuchung</i>	56
<i>Versuchsdurchführung Phase 2</i>	56
<i>Ernte, Probenahme und Qualität von Zuckerrüben</i>	57
<i>Pflanzenaufschluss und Nährstoffanalyse</i>	57
<i>Statistische Auswertung</i>	57
ERGEBNISSE.....	58
<i>Bodenuntersuchung</i>	58
<i>Pflanzenanalyse, Ertrag und Qualität der Zuckerrübe</i>	59
DISKUSSION	61
<i>Phosphor</i>	61
<i>Kalium</i>	63
SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	67
LITERATUR	68
V. EPILOG	72
NACHHALTIGE PRODUKTIVITÄTSSTEIGERUNG – HERAUSFORDERUNG MODERNER DÜNGBERATUNG	72
ZIELGERICHTETE DÜNGUNG	73
SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	75
ZUSAMMENFASSUNG	77
VI. LITERATUR	79
VII. ANHANG	92
DANKSAGUNG	94
LEBENS LAUF.....	95



Artikelverzeichnis

Folgende Artikel der vorliegenden Dissertation wurden bereits publiziert oder sind für eine Publikation vorgesehen:

FISCHER S., H.-J. KOCH, K. BÜRCKY (2015): Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Archives of Agronomy and Soil Science* 61, 725-736.

DOI: 10.1080/03650340.2014.953070.

FISCHER S., H.-J. KOCH, D. HORN, B. MÄRLÄNDER (eingereicht): Multivariate approach to predict the effect of liming on extractable phosphorus and potassium on loess soils with pH close to 7. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.

FISCHER S., K. BÜRCKY, H.-J. KOCH, B. MÄRLÄNDER (2013): Einfluss einer Kalkung auf EUF-extrahierbares Phosphor und Kalium im Boden sowie auf Nährstoffentzug, Ertrag und Qualität von Zuckerrüben bei differenzierter Kaliumdüngung in Feldversuchen. *Sugar Industry/Zuckerindustrie* 138, 778–787.



Tabellenverzeichnis

Tabellen im Prolog

Tabelle 1: Inlandsabsatz (Deutschland) mineralischer Düngemittel nach Nährstoffarten in 1.000 t Nährstoff.....	1
---	---

Tabellen in Artikel 1

Table 1: Number of trials in the respective nutrient supply level before trial establishment.	15
Table 2: Analysis of variance (F-Test) for the two fractions (F1, F2) of EUF nutrients and anodic filtrate volume (AFV), and the sum of both fractions (Σ). The analysis included the treatments 0, 3 and 12 t CaO ha ⁻¹ for an incubation period of 4, 8, 16 and 24 weeks after liming of 62 environments.	15
Table 3: Anodic filtrate volume (AFV) for the two EUF fractions (F1, F2) and the sum of both fractions (Σ) in the three lime treatments 0, 3 and 12 t CaO ha ⁻¹ (Ca00, Ca03 and Ca12). Mean of 62 environments and four sampling dates.....	20

Tabellen in Artikel 2

Table 1: The measure of sampling adequacy (MSA), rotated factor loadings and final communality estimates (h^2) after principle component analysis on the basis of soil analysis data before trial establishment from 62 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).....	32
Table 2: History of cluster analysis with the respective R-square statistic (RSQ), cubic cluster criterion (CCC), pseudo F statistic (PSF) and pseudo t ² statistic (PST2) on the basis of soil analysis results before trial establishment from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).....	35
Table 3: History of the iterative discriminant analysis and the number of environments classified per cluster with the respective share of correctly classified environments. Data base were results from soil analysis before trial establishment of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).	35
Table 4: Description of cluster properties according to the principle components PC1 – PC4 in relation to the range of the properties at the trial sites in the respective cluster C1 – C6. Data base were results from soil analysis before trial establishment of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).	36



Tabellenverzeichnis

Table 5: Analysis of variance (F-Test) for the two EUF nutrient fractions (F1, F2), the sum of both fractions (Σ) and the pH. The F-Test included results from soil analysis of the lime treatments 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ 24 weeks after liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011)..... 36

Table 6: Pearson's coefficient of correlation for the difference (Δ) of EUF nutrient contents between lime and control treatments of the fractions (F1, F2) and the sum of both fractions (Σ) of phosphorus (P) and potassium (K) versus buffer capacity (PC3) and EUF calcium fractions (Ca_{F1}, Ca_{F2}). Data base were results from soil analysis 24 weeks after liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). (underlined coefficients are significant at $p \leq 0.01$)..... 40

Tabellen in Artikel 3

Tabelle 1: Boden- und Klimaeigenschaften der Versuchsstandorte..... 54

Tabelle 2: Calcium (Ca_{EUF})-, Kalium (K_{EUF})- und Phosphor (P_{EUF})-Gehalt in beiden EUF-Fraktionen (F1, F2) und pH_{CaCl2}-Wert der Standorte vor der Kalkung, sowie Einfluss der Kalkung mit 0, 3 und 12 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0, CaO-3 und CaO-12) im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands zum Zeitpunkt 24 Wochen nach der Ausbringung. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test) 55

Tabelle 3a: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf Gehalt und Entzug von Phosphor (P) und Kalium (K) in Zuckerrüben im Mittel von 88 Umwelten an 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)..... 59

Tabelle 3b: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 118 Umwelten an 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)..... 59

Tabelle 4: Signifikanz der Effekte von Kalk- und Kaliumdüngung und deren Wechselwirkung auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. ns = nicht signifikant; *, **, *** = signifikant bei $p \leq 0,05, 0,01, 0,001$ (ANOVA F-Test) 60



Tabellenverzeichnis

Tabelle 5: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf den Phosphor (P)-Gehalt und P-Entzug von Zuckerrüben in den Varianten der Kaliumsteigerung im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test)..... 62

Tabelle 6: Einfluss einer Kaliumdüngung mit 0, 200 und 400 kg K₂O ha⁻¹ (entsprechend K₂O-0, K₂O-200 und K₂O-400) auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test) 63

Tabellen im Epilog

Tabelle 1: Mittelwerte von Calcium- (Ca-) Karbonatgehalt, Basensättigung-Ca, pH-Wert sowie EUF-Ca und EUF-Kalium (K) in zwei Fraktionen (F1, F2) im Boden (0-30 cm) von 10 Versuchsstandorten in den Gruppen G1236 (n=7) und G45 (n=3) in Deutschland (2010, 2011) vor Versuchsbeginn..... 72

Tabellen im Anhang

Anhang 1: Signifikanz (F-Test) der Effekte einer Kalkung, einer Kaliumdüngung und einer Standortgruppierung sowie deren Wechselwirkung auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von maximal 118 Umwelten im Süden und der Mitte Deutschlands. ns = nicht signifikant; *, **, *** = signifikant bei $p \leq 0,05, 0,01, 0,001$ (ANOVA F-Test). 92

Anhang 2: Anzahl der Standorte (S) und Umwelten (U) in den Gruppen G1236 und G45 insgesamt sowie für die Pflanzenanalyse und aufgeteilt in Umwelten ohne (K0) und mit (K1) Kaliumdüngung 93

Abbildungsverzeichnis

Abbildungen im Prolog

Abb. 1: Projektstruktur – beteiligte Unternehmen und Arbeitsschwerpunkte der Teilprojekte.	6
--	---

Abbildungen in Artikel 1

Figure 1: Location of 62 trial sites in Germany and Austria.....	12
Figure 2: (a) Texture, (b) humus, (c) carbonate and (d) EUF extractable calcium (Ca) content and (e) pH in the top soil of 62 environments in Germany and Austria before lime application. Boxplots display the 5, 10, 25, 75, 90 and 95 percentile; the mean is depicted as the dashed line inside the box, the median as the solid line. F1 = 1st EUF fraction; F2 = 2nd EUF fraction.	13
Figure 3: EUF extractable (a) phosphorous (P) and (b) potassium (K) content in the top soil of 62 environments in Germany and Austria before lime application. Boxplots display the 5., 10., 25., 75., 90. and 95. percentile; the mean is depicted as the dashed line inside the box, the median as the solid line. F1 = 1st EUF fraction; F2 = 2nd EUF fraction.....	14
Figure 4: Effect of lime applied in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha ⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) and incubation period of 4, 8, 16 and 24 weeks after liming (wal4 - wal24) on EUF extractable nutrients (a) Ca, (b) P, (d) K and (c) pH in the top soil of 62 environments in Germany and Austria. The first column (wal0) represents the mean of one sample per replication and environment before application of lime. The data of wal0 were not included in the ANOVA. Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to the 1st and 2nd EUF fraction, respectively. Capital letters refer to the sum of both fractions.	18

Abbildungen in Artikel 2

Figure 1: Bivariate plots of the principle component analysis of 17 parameters from soil analysis of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Different colors represent different clusters – brown (C1), yellow (C2), red (C3), green (C4), grey (C5) and blue (C6). Principle components (PC) were interpreted as soil texture (PC1), organic potential (PC2), buffer capacity (PC3) and potassium capability (PC4) (Table 4).....	34
--	----



Abbildungsverzeichnis

- Figure 2:** Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on soil contents of (a) calcium (Ca), (b) phosphorous (P) and (c) potassium (K) as determined by electro-ultrafiltration (EUF) in different clusters (C1 – C6) separately for EUF fraction F1 and F2 and the sum of both fractions. Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x cluster..... 37
- Figure 3:** Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on the pH value in the soil in different clusters (C1 – C6). Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x cluster..... 38
- Figure 4:** Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on the (a) calcium (Ca) content, (b) pH, (c) phosphorous (P) content and (d) potassium (K) content as determined by electro-ultrafiltration (EUF) in the soil of the groups G1236 and G45. Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x group..... 39
- Figure 5:** Calcium (Ca) content of the second EUF fraction (F2) and pH in the soil of six clusters (C1 – C6) before liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Bars show the cluster mean, whiskers the standard deviation. Number of environments contributing to each cluster: C1=23; C2=8; C3=7; C4=9; C5=7 and C6=4.. 40
- Figure 6:** Linear regression and confidence interval (95%) for the difference between lime and control treatments of EUF extractable phosphorus ($\Delta P_{\Sigma F1, F2}$) 24 weeks after liming versus (a) the buffer capacity (PC3) and (b) EUF calcium in the second fraction (Ca_{F2}) from soil samples taken before trial establishment. Data base were results from soil analysis of liming trials in 58 environments with doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ in Germany and Austria (2010 and 2011)..... 41

Abbildungen in Artikel 3

- Abb. 1:** Lage der Versuchsstandorte in Deutschland..... 53



Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2:** Einfluss einer Branntkalk-Düngung (0, 3, 12 t CaO ha⁻¹) auf EUF-extrahierbaren Phosphor (P_{EUF}) in der 1. und 2. EUF-Fraktion im Boden 24 Wochen nach der Kalkung. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich in Fraktion 2 nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test). Die Kalkung hatte keinen signifikanten Einfluss auf P_{EUF} in Fraktion 1 und auf die Summe Fraktion 1+2 57
- Abb. 3:** Einfluss einer Branntkalk-Düngung (0, 3, 12 t CaO ha⁻¹) auf EUF-extrahierbares Kalium (K_{EUF}) in der 1. und 2. EUF-Fraktion im Boden 24 Wochen nach der Kalkung. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichen Buchstaben (Kleinbuchstaben Fraktion 2, Großbuchstaben Summe Fraktion 1+2) unterscheiden sich nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test). Die Kalkung hatte keinen signifikanten Einfluss auf K_{EUF} in Fraktion 1 58
- Abb. 4:** Einfluss einer Branntkalk- (0 und 3 t CaO ha⁻¹) und Kaliumdüngung (0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹) auf den Kalium (K)-Gehalt und den K-Entzug von Rübe und Blatt der Zuckerrübe. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Die Wechselwirkung von Kalk- und Kaliumdüngung war ohne signifikanten (ns) Einfluss auf die Messparameter bei $p \leq 0,05$ (F-Test) 64
- Abb. 5:** Einfluss einer Branntkalk- (0 und 3 t CaO ha⁻¹) und Kaliumdüngung (0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹) auf den Bereinigten Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrüben. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test)..... 65

Abbildungen im Epilog

- Abb. 1:** Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (Ca0, Ca3) sowie einer Kaliumdüngung mit 0 (K0) und 200/400 kg K₂O ha⁻¹ (K1) auf den Kaliumgehalt und -entzug von Zuckerrüben und Blatt in den Gruppen G1236 und G45. Die Ergebnisse resultieren in der Summe aus 89 Umwelten in Deutschland (2011, 2012). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0.05$ 73



Abbildungsverzeichnis

Abb. 2: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (Ca0, Ca3) sowie einer Kaliumdüngung mit 0 (K0) und 200/400 kg K₂O ha⁻¹ (K1) auf den Rüben-Frischmasseertrag (RE_{FM}), Zuckergehalt (ZG) und Bereinigten Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrüben in den Gruppen G1236 und G45. Die Ergebnisse resultieren in der Summe aus 118 Umwelten in Deutschland (2011, 2012). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0.05$ 74



Abkürzungsverzeichnis

AFV	Anodic filtrate volume
ANOVA	Analysis of variance
BZE	Bereinigter Zuckerertrag
CA	Cluster analysis
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
CCC	Cubic cluster criterion
DA	Discriminant analysis
EUf	Elektro-Ultrafiltration
F1	Erste EUf-Fraktion
F2	Zweite EUf-Fraktion
h^2	Communality estimate
MSA	Measure of sampling adequacy
PC	Principle component
PCA	Principle component analysis
PSF	Pseudo F statistic
PST2	Pseudo t^2 statistic
RE_{FM}	Rüben-Frischmasseertrag
RSQ	R-square
wal	Weeks after liming
ZG	Zuckergehalt





I. Prolog

Einleitung

Die Düngung ackerbaulich genutzter Böden ist Teil einer nachhaltigen Landwirtschaft. Mit jeder Ernte werden dem Boden Nährstoffe entzogen, die, je nach Versorgungszustand, früher oder später ersetzt werden müssen. Finck (1992 p. 3) definiert: „Ziel des Düngereinsatzes ist die Erzielung hoher und hochwertiger Erträge durch Verbesserung der Nährstoffversorgung der Pflanzen unter Erhaltung oder Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit ohne nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt.“ Damit beschreibt Finck einerseits das allgemeine Bestreben nach einem effizienten Pflanzenbau durch optimierte Pflanzenernährung. Andererseits fordert er aber auch eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung ohne schädliche Einflüsse der Düngung auf Boden und Umwelt. Demnach sollen in der Düngeplanung nicht allein wirtschaftliche Interessen berücksichtigt werden.

Landwirtschaftliche Betriebe setzen in Deutschland neben wirtschaftseigenen, organischen Düngern, mineralische Düngemittel ein (Tab. 1). Zur Bestimmung der optimalen Düngermenge beschreibt Beringer (1985) drei grundlegende Philosophien: 1. Das Konzept der Bilanzierungsmethoden, wobei unabhängig des Nährstoffstatus im Boden, Nährstoffabfuhr durch -zufuhr ausgeglichen werden muss. 2. Das Konzept harmonischer, ausgeglichener Nährstoffverhältnisse. Dabei ist das Ziel, die Kationenaustauschkapazität der Böden gemäßiger Klimata zu 65 % durch Calcium (Ca), zu 10 % durch Magnesium und zu 5 % durch Kalium zu sättigen. 3. Das Versorgungskonzept, das auf dem Nährstoffstatus des Bodens beruht und wobei dieser auf ein Niveau gebracht/gehalten werden soll, bei dem durch weitere Düngung kein zusätzlicher Mehrertrag erzielt werden kann. Beringer (1985) schlussfolgert über die Eignung der Bodenuntersuchung zur Vorhersage des Düngebedarfs, dass der einzige Weg zur Überwachung und Korrektur von Veränderungen der Bodenfruchtbarkeit, die regelmäßige Bodenuntersuchung auf pflanzenverfügbare Nährstoffe ist.

Tabelle 1: Inlandsabsatz (Deutschland) mineralischer Düngemittel nach Nährstoffarten in 1.000 t Nährstoff.

Wirtschaftsjahr	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO
2010/2011	286	434	2.276
2011/2012	247	386	2.398
2012/2013	284	421	2.539

Quelle: Statistisches Bundesamt (2014)



Bodenuntersuchung

Die Zusammensetzung des Bodens als Medium, dem Pflanzen Nährstoffe entnehmen, wurde seit van Helmonts erstem belegten Gefäßversuch mit Weidenzweigen im Jahr 1620 wissenschaftlich untersucht (Schilling 2000). Aber erst mit der Einführung der Mineralstofftheorie durch Carl Sprengel (1828) und deren Verbreitung durch Justus von Liebig (1840) wurde die Agrikulturchemie begründet, und damit begann die gezielte Untersuchung von Böden auf Nährstoffgehalte (Ploeg et al. 1999). Lemme (2014) beschreibt die Entwicklung der Bodenuntersuchung in Deutschland von Sprengel und Liebig bis zu den heute verwendeten Methoden. Dabei sind insbesondere fünf Verfahren erwähnenswert, die in der praktischen Landwirtschaft und damit der Düngeberatung Verwendung finden. Zur Bestimmung des Phosphor- und Kaliumgehalts im Boden wird heute überwiegend die Ca-Acetat-Lactat-Methode angewendet (Schüller 1969), in manchen Regionen Deutschlands auch die Doppel-Lactat-Methode (nach Egner und Riehm in Behr 1949). Magnesium und der pH-Wert werden im Ca-Chlorid-Auszug gemessen, und für die Bestimmung des Stickstoffgehaltes wird die Nmin-Methode (Wehrmann und Scharpf 1979) verwendet. Bei diesen vier Verfahren werden die Nährstoffe extrahiert, indem das Bodenmaterial mit einer Extraktionslösung gemischt und anschließend über einen definierten Zeitraum geschüttelt wird. Die Nährstoffe werden schließlich konventionell im Filtrat gemessen. Davon unterscheidet sich die fünfte Bodenuntersuchungsmethode grundsätzlich. Bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF; Németh 1976, 1979) werden die Nährstoffe mittels einer durch Spannung, Temperatur und Vakuum unterstützten Wasserextraktion aus der Bodensuspension herausgefiltert. Durch Variation dieser Extraktionsparameter können, zeitlich getrennt, verschiedene Fraktionen abgezogen werden, die eine unterschiedliche Nährstoffverfügbarkeit im Verlauf der Vegetationsperiode simulieren (Németh 1982, 1985).

Die Bodenuntersuchung allein ist jedoch für die Bestimmung der optimalen Düngemenge nicht ausreichend. Während die meisten Untersuchungsmethoden den sofort verfügbaren Nährstoffgehalt des Bodens zum Zeitpunkt der Probenahme wiedergeben, müssen darüber hinaus weitere Einflussgrößen für die Berechnung der Düngemenge geschätzt und berücksichtigt werden. Wesentliche Faktoren sind das kulturartspezifische Nährstoffaneignungsvermögen, die Nährstoffdynamik der Rhizosphäre, mögliche Wechselwirkungen zwischen den Nährstoffen und deren Nachlieferung während der Vegetationsperiode. Außerdem können Standortfaktoren wie Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung die Bestimmung der optimalen Düngemenge beeinflussen. Die



Prolog

Bodenuntersuchung mittels EUF kann die Nährstoffnachlieferung während der Vegetationsperiode aufgrund der verschiedenen Nährstofffraktionen abschätzen. Überdies ermöglicht es die Methode, Wechselwirkungen zwischen Nährstoffen zu berücksichtigen, da alle Nährstoffe aus demselben Aliquot bestimmt werden. Damit wird die Streuung vermieden, die auftritt, wenn Proben geteilt werden müssen, um die einzelnen Nährstoffe mit verschiedenen Methoden zu bestimmen.

Wechselwirkungen können von Bedeutung sein, wenn infolge einer Düngung das Mengenverhältnis zwischen den Nährstoffen im Boden verändert (Grimme und Németh 1975) und die Aufnahme eines nicht gedüngten Nährstoffs beeinflusst wird (Moore und Quimet 2010; Seggewiss und Jungk 1988; Truog 1948). Prominentes Beispiel hierfür ist das von Ehrenberg (1920) formulierte Kalk-Kali-Gesetz. Die Kalkung, mit der gleichzeitigen Zufuhr einer großen Menge von Ca-Ionen sowie der Anhebung des pH-Wertes, kann die Ursache für Wechselwirkungen zu anderen Nährstoffen sein (Mengel 1984). In erster Linie wird die Kalkung angewendet zur Anhebung des pH-Wertes und damit zur Reduzierung von gelösten und austauschbar gebundenen Aluminium- und anderen Schwermetallionen (Foy et al. 1978), sowie zur Verbesserung der Bodenstruktur durch die Versorgung des Bodens mit zweiwertigen Ca-Ionen (Haynes und Naidu 1998). Während eine Kalkung von Böden mit niedrigem Ca-Gehalt und/oder niedrigem pH-Wert unerlässlich ist, kann damit einhergehend, die Extrahierbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit anderer Nährstoffe beeinflusst werden (Haynes 1984; Jaskulska et al. 2014; Lemme 2014; Scheffer und Scheffer 1984; Wasner et al. 2001). Düngempfehlungen, die derzeit in Deutschland auf Basis von Bodenuntersuchungsergebnissen erstellt werden, berücksichtigen beispielsweise einen hohen pH-Wert oder hohen Ca-Gehalt bei der Berechnung des empfohlenen Phosphors (Horn et al. 2009; VDLUFA 2002a). Mögliche Nährstoffwechselwirkungen, die infolge einer empfohlenen, d. h. noch auszubringenden Kalkung auftreten, werden bei der Berechnung der Düngempfehlung bislang nicht berücksichtigt. Für eine verbesserte Düngberatung ist es aber wünschenswert, Standorte aufgrund der Bodenuntersuchung identifizieren zu können, an denen Nährstoffwechselwirkungen nach einer Kalkung auftreten werden.

Düngberatung auf Basis der EUF-Methode

Ab Ende der 1960er Jahre verschlechterte sich in Österreich die technische Qualität von Zuckerrüben aufgrund zu hoher Düngergaben (Wiklicky 1982). Zur Verbesserung der Zuckerausbeute suchte die Rüben verarbeitende Industrie nach einem geeigneten Werkzeug



Prolog

für die Düngeberatung. Ebenso waren Rüben liefernde Landwirte an einer Lösung interessiert, um den Anbau von Zuckerrüben wirtschaftlich zu optimieren. Dies war Anlass, erste Versuche zu unternehmen, eine Düngeberatung auf Basis der EUF-Methode (Németh 1972, 1976) zu etablieren. Zwischen 1974 und 1979 wurden im Bereich der Zuckerfabrik Tulln mehr als 330 Feldversuche mit Zuckerrüben und anderen Kulturen durchgeführt (Wiklicky 1982). Dabei standen zunächst die für die Saftreinheit wesentlichen Nährstoffe Stickstoff (N), Kalium (K) und Natrium im Vordergrund. Die Versuche ergaben hohe Korrelationen zwischen den Nährstoffgehalten der Rübe und den EUF-Nährstoffgehalten im Boden. Insbesondere für K wurden unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit dem N-Entzug gute Beziehungen gefunden.

Während in Österreich bereits 1974 ein Labor für die Serienuntersuchung mit der EUF-Methode eingerichtet wurde (Wiklicky und Németh 1981), prüfte die Zuckerindustrie in Deutschland zunächst andere Verfahren und Methoden zur Düngungsoptimierung. In Norddeutschland wurde ab 1976 die Nmin-Methode (Wehrmann und Scharpf 1979) etabliert. Im Bereich der damaligen Süddeutschen Zucker-AG versuchte man ein Bilanzierungsmodell für N zu entwickeln (Irion 1976). Dabei konnte der Landwirt anhand eines Formulars individuelle betriebs- und flächenspezifische Faktoren gegen den geschätzten Bedarf verrechnen. Die N-Bilanzierung brachte aber aufgrund einer fehlenden Bodenuntersuchung nicht den gewünschten Erfolg (Irion 1988). Daraufhin wurde die N-Bilanzierung mit der Nmin-Bodenuntersuchung verknüpft und zwischen 1975 und 1982 mit mehr als 270 Feldversuchen und 30.000 Nmin-Proben geeicht (Günther 1978, 1988). Obwohl der fachliche Erfolg dieser „N-Düngung nach Diagnose“ mit einer Reduzierung der N-Düngung von durchschnittlich 260 kg N ha^{-1} im Jahr 1975 auf circa 150 kg N ha^{-1} im Jahr 1982 beachtlich war (Günther 1988), konnte sich das Beratungssystem aufgrund geringer Praktikabilität nicht durchsetzen (Köhler 1997). Ein Problem war die Laborkapazität, da sich der Zeitraum zwischen Nmin-Probenahme und Aussaat von Zuckerrüben im Frühjahr für die flächendeckende Untersuchung als zu kurz erwies. Zudem zeigten die Landwirte eine geringe Akzeptanz aufgrund der Bodenprobenahme im Frühjahr bis 90 cm Tiefe und der nötigen Kühlkette vom Feld bis ins Labor.

Während die Zuckerfabrik Tulln in Österreich zu Beginn der 1980er Jahre Düngeempfehlungen auf Basis der EUF-Methode bereits für etwa 25.000 ha jährlich aussprach (Wiklicky und Németh 1981), wurde die Methode in Süddeutschland von 1978 bis 1982 in 110 Feldversuchen mit der „N-Düngung nach Diagnose“ verglichen und als gleichwertig



Prolog

erkannt (Günther 1988; Köhler 1997). Zudem war die Probenahme aus dem Oberboden im Sommer vor dem Anbau von Zuckerrüben praktikabel und ohne Kühlkette anwendbar. Neben einer flächendeckenden Beprobung ermöglichte das System eine rechtzeitige Düngeplanung. Außerdem konnte mit der Extraktion der zwei Nährstofffraktionen eine schlagbezogene Aussage über das Nachlieferungsvermögen aller Nährstoffe des Bodens getroffen werden. Mit der Inbetriebnahme eines eigenen Labors begann in Süddeutschland ab 1982 die flächendeckende Düngeberatung für Zuckerrüben auf Basis der EUF-Methode (Wiedemann 1982).

Unabhängig davon führte die Süddeutsche Zucker-AG 1978 die individuelle Bezahlung nach Zuckergehalt ein (Wiedemann 1978). 1982 folgte die Zuckerfabrik Franken GmbH (Anonymus 1982). In Verbindung mit der ebenfalls eingeführten Prämie für gute Rübenqualität erhöhte diese Maßnahme die Sensibilität der Landwirte für eine fachgerechte Düngung der Rüben (Köhler 1997; Wiedemann 1978, 1982). Die technische Qualität wurde dabei zunächst nach Reinefeld et al. (1974) und ab 1996 mit der neu bewerteten Formel nach Buchholz et al. (1995) geschätzt. In der Auswertung von Glattkowski und Märländer (1995) bewies die N-Düngung im Vergleich zu Standort und Jahr nur einen geringen Einfluss auf den Bereinigten Zuckerertrag. Der Ausbeuteverlust (Standardmelasseverlust + Fabrikverlust) war dagegen durch die N-Düngung mit rund 16 % der Varianz gut beeinflussbar. Infolge der durch die Qualitätsanalyse begleiteten Düngeberatung wurde die Düngermenge für den Anbau von Zuckerrüben auf circa 100 kg N ha^{-1} reduziert und damit zugleich der Amino-N-Gehalt (Fürstenfeld und Horn 2010).

Neben der Zuckerrübe wurde die Düngeberatung auf Basis der EUF-Methode für weitere Kulturen wie Getreide, Mais, Kartoffeln und Reben geeicht (Eifert et al. 1985; Horn 1990; Maier 1988; Ziegler 1989). Zudem wurden Eichversuche zur Weiterentwicklung der EUF-Methode (Günther 1988) und Versuche zur Bewertung von Gülle (Fürstenfeld 1985) und Zwischenfrüchten durchgeführt (Fürstenfeld et al. 2012). Horn (2006) entwickelte eine dritte Fraktion unter Zugabe von DTPA für die Extraktion von Mikronährstoffen. Heute werden für die Düngeberatung auf Basis der EUF-Methode jährlich Bodenproben untersucht, die eine Fläche von rund 120.000 ha in Deutschland repräsentieren, 23.000 ha in Polen und 32.000 ha in Österreich (Horn 2015; Izdebski 2015; Kempl 2015).

Aufbau des EUF Projektes und Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit (Sven Fischer und Holger Lemme)

Die Ca-Versorgung von Ackerböden spielt eine entscheidende Rolle; neben einer ausreichenden Ca-Ernährung der jeweiligen Kultur steht insbesondere die Verbesserung der Bodenstruktur durch Flockung der Tonminerale und Bildung von Ton-Humus-Komplexen im Vordergrund (Mengel 1984; Molitor et al. 2012; Scheffer und Schachtschabel 2010). Der Ca-Bedarf steigt mit steigendem Tongehalt (Scheffer und Schachtschabel 2010). Unter humiden Bedingungen unterliegen die Ca-Ionen der Auswaschung und müssen besonders auf carbonatarmen Standorten regelmäßig zugeführt werden. Dafür und um einer durch vielfältige Prozesse permanent wirkenden Bodenversauerung entgegenzuwirken, ist es üblich, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen zu kalken.

Die Beurteilung der Kalkbedürftigkeit eines Standorts erfolgt bei der EUF Düngeempfehlung anhand des EUF extrahierbaren Ca-Gehaltes der zweiten EUF-Fraktion, die den nachlieferbaren Teil der Nährstoffe beschreibt. Liegt dieser unter $40 \text{ mg } (100 \text{ g Boden})^{-1}$, so ist von einer unzureichenden Ca-Sättigung der Austauscher ($< 80 \%$) und einem Kalkbedarf auszugehen (Németh et al. 1989). Insbesondere im pH-Bereich von 6,5 bis 7,1 zeigt der

EUF-Ca-Gehalt der zweiten Fraktion den Kalkbedarf deutlich sensitiver an als der pH-Wert allein, sodass auch nahezu neutrale Böden eine zu geringe Ca-Sättigung und somit einen Kalkbedarf aufweisen können (Németh et al., 1989).

Ausgehend von den mit Kalk zugeführten Ca-Ionen einerseits und dem Anstieg des Boden-pH-Wertes durch Neutralisation von Protonen (H^+) andererseits, kann sowohl die Pflanzenverfügbarkeit als auch die Extrahierbarkeit verschiedener Nährstoffe im Boden beeinflusst werden. Folglich war es das Ziel des EUF Projektes „Nährstoffwechsel-



Abb. 1: Projektstruktur – beteiligte Unternehmen und Arbeitsschwerpunkte der Teilprojekte.



Prolog

wirkungen im Boden“, den Einfluss einer Kalkung schwach Ca-versorgter, zum Teil pH neutraler, toniger Böden auf die mittels EUF extrahierbaren Nährstoffgehalte (insbesondere Phosphor (P) und K) im Zeitverlauf nach der Kalkzufuhr zu quantifizieren, die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe durch Versuche mit Zuckerrüben zu erfassen und die EUF Düngeempfehlung durch Berücksichtigung eventueller Effekte der Kalkung weiter zu optimieren.

Das Projekt wurde durch die Südzucker AG, die Bodengesundheitsdienst GmbH, die EUF-Arbeitsgemeinschaft zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit und die K+S KALI GmbH finanziert. In zwei Teilprojekten sollte der Einfluss einer Kalkung sowohl unter standardisierten Bedingungen im Labor bzw. Gewächshaus als auch unter Feldbedingungen untersucht werden (Abb. 1).

Teilprojekt 1 – Laborinkubations- und Gewächshausversuche (Holger Lemme)

Innerhalb des ersten Teilprojektes war es das Ziel, die Mechanismen und Wirkungszusammenhänge einer Kalkung des Bodens grundlegend in Modellversuchen zu klären (Lemme 2014). Hierzu wurden in Gefäßversuchen nach einer Kalkung des Bodens die mittels EUF extrahierbaren und in Gewächshausversuchen die für die Zuckerrübe pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte untersucht. Zur Unterscheidung der durch Kalkzufuhr verursachten Erhöhung des Ca-Gehaltes und des Anstieges des pH-Wertes, wurde den Böden in weiteren Varianten Gips zur pH neutralen Erhöhung des Ca-Gehaltes bzw. Natronlauge zur Ca-freien pH-Anhebung anstelle von Branntkalk zugesetzt.

Insbesondere das Phosphat (PO_4 bzw. im folgenden P) im Boden zeichnet sich durch eine auf beide Kalkeffekte (Anstieg von Ca-Gehalt und pH-Wert im Boden) sensible Dynamik aus. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann P im Boden, je nach Fortschreiten der Pedogenese, in Form von Apatit, sonstigen gefällten Calcium- (Ca) P, und gefällten Eisen- (Fe) und Aluminium- (Al) P sowie an Fe- und Al-Oxiden bzw. an Ca sorbiert, in der organischen Substanz gebunden und zu einem sehr geringen Anteil gelöst in der Bodenlösung vorliegen (Scheffer und Schachtschabel 2010). Dabei sind Ca-P grundsätzlich zunehmend im saurer werdenden Milieu, das heißt mit sinkendem pH-Wert, löslich, wohingegen die Löslichkeit und Desorption der Fe/Al-P mit zunehmendem pH-Wert ansteigt. Die Zufuhr großer Ca-Mengen durch Kalkung ließ, insbesondere in Kombination mit dem steigenden pH-Wert, die zunehmende Bildung von Ca-P erwarten. Jedoch könnten auch Fe/Al-P, sofern sie im schwach sauren bzw. fast neutralen pH-Bereich vorhanden sind (Machold 1963), mit steigendem pH-Wert mobilisiert werden. Zudem war nicht klar, ob



Prolog

steigende Ca-Gehalte im Boden zwangsläufig zu einer Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit von P oder der P-Extrahierbarkeit führen, schließlich kann P im alkalischen Bereich auch über Ca-Brücken an Fe-Oxiden sorbiert werden (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Folglich lag der Schwerpunkt von Teilprojekt 1 in der Untersuchung der P-Extrahierbarkeit mittels EUF, der Pflanzenverfügbarkeit von P für Zuckerrüben in Gefäßversuchen und der verschiedenen P-Fractionen im Boden nach einer Kalkanwendung. Darüber hinaus war es möglich, aufgrund der Erfassung sämtlicher Pflanzennährstoffe, sowohl durch EUF (N, P, K, Ca, Mg, Na, S, B) als auch bei der Pflanzenanalyse (P, K, Ca, Mg, Na, S, B, Fe, Mn, Cu, Zn), Aussagen hinsichtlich des Einflusses einer Kalkung auf die Extrahierbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit weiterer Nährstoffe in Gefäßversuchen zu treffen.

Die Ergebnisse von Teilprojekt 1 werden von Lemme (2014) beschrieben.

Teilprojekt 2 – Feldinkubations- und Felddüngungsversuche (Sven Fischer)

Ziel des zweiten Teilprojektes war die Untersuchung des Einflusses einer Kalkung auf EUF-extrahierbare und für Zuckerrüben pflanzenverfügbare Nährstoffe unter Feldbedingungen und damit auch die Validierung der in Teilprojekt 1 gewonnenen Erkenntnisse.

In den Feldversuchen wurden, zusätzlich zur Kalkung, Varianten mit unterschiedlich hoher Kalium- (K-) Düngung etabliert. Diese ermöglichten die Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den Kationen bei unterschiedlich hohen Düngergaben und sollten Schlussfolgerungen hinsichtlich des Einflusses einer Kalkung auf Nährstoff-Nachlieferungsprozesse im Boden und das Nährstoff-Aneignungsvermögen von Zuckerrüben zulassen.

Der Einfluss einer Kalkung auf die K-Gehalte im Boden und die Pflanzenverfügbarkeit von K wird in der Literatur nicht einheitlich beschrieben. An den Austauschern im Boden kann K als Folge der Ca-Zufuhr desorbiert und so auf Böden mit einer geringeren Pufferkapazität verlagert werden (Schwertmann et al. 1976). Auch die K-Aufnahme wird infolge der Kalkung behindert (Ehrenberg 1920; Várnai et al. 1985). Der Ertrag von Zuckerrüben stieg aber nach einer Kalkung in Versuchen von Grass und Budig (1976). Und auch bei Ehrenberg (1920) und Várnai et al. (1985) egalisierte eine zusätzlich zur Kalkung ausgebrachte K-Düngung den negativen Effekt der Kalkgabe. Gefäßversuche von Grimme et al. (1973) weisen darauf hin, dass Ionenantagonismen zwischen K und Magnesium, aber



Prolog

auch zwischen K und Ca hierbei von Bedeutung sein können, vor allem bei Böden, die sich im K-Mangelbereich befinden.

Der Schwerpunkt des zweiten Teilprojekts lag in der Untersuchung der mittels EUF extrahierten P- und K-Gehalte von Lössböden unter Feldbedingungen im Zeitverlauf nach einer Kalkung, sowie der Differenzierung und anschließenden Gruppierung von Standorten aufgrund von Parametern der Bodenuntersuchung. Desweiteren wurden Nährstoffaufnahme und –entzug, sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben in Feldversuchen untersucht, die nach einer Kalkung unterschiedlich mit K gedüngt wurden.



Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation beinhaltet drei zur Publikation eingereichte bzw. bereits veröffentlichte Artikel.

Artikel 1: *Sven Fischer, Heinz-Josef Koch, Klaus Bürcky* (2015): Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Archive of Agronomy and Soil Science* 61, 725–736. DOI: 10.1080/03650340.2014.953070.

Der Artikel befasst sich mit dem Einfluss der Kalkung auf EUF-extrahierbares Phosphor und Kalium in Lössböden, wobei die Nährstoffgehalte der Böden im Zeitverlauf von 24 Wochen nach der Kalkgabe betrachtet werden.

Artikel 2: *Sven Fischer, Heinz-Josef Koch, Dietmar Horn, Bernward Märländer* (eingereicht): Multivariate approach to predict the effect of liming on extractable phosphorus and potassium on loess soils with pH close to 7. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.

Im Fokus dieses Artikels steht die Differenzierung ähnlicher Versuchsstandorte auf Basis von Daten der Bodenuntersuchung mit dem Ziel, den Einfluss einer Kalkung auf Phosphor und Kalium im Boden für einzelne Standorte bzw. Standortgruppen vorherzusagen.

Artikel 3: *Sven Fischer, Klaus Bürcky, Heinz-Josef Koch, Bernward Märländer* (2013): Einfluss einer Kalkung auf EUF-extrahierbares Phosphor und Kalium im Boden sowie auf Nährstoffentzug, Ertrag und Qualität von Zuckerrüben bei differenzierter Kaliumdüngung in Feldversuchen. *Sugar Industry/Zuckerindustrie* 138, 778-787.

Neben den Nährstoffgehalten des Bodens, sind Nährstoffaufnahme und Ertragsleistung der Pflanze das Maß für die Erstellung einer Düngeempfehlung. Artikel 3 beschreibt den Einfluss der Kalkung auf diese Parameter am Beispiel der Zuckerrübe.

Abschließend werden die Artikel im Hinblick auf Herausforderungen der aktuellen Düngeberatung zusammengefasst.



II. Artikel 1

Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration (EUF)

Sven Fischer, Heinz-Josef Koch, Klaus Bürcky

Abstract

The benefits of liming acidic or calcium (Ca) deficient soils for soil structure and fertility are well documented. However, little is known about the effect of liming nearly neutral loess soils – lacking Ca – on interactions between soil nutrients. In two years 62 field trials were conducted in Germany and Austria with three treatments (0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹) on slightly acid loess soils. Soil samples from the top soil layer were taken 4, 8, 16 and 24 weeks after liming. In addition to the pH_{CaCl₂}, the phosphorus (P), potassium (K) and Ca contents were analyzed using electro-ultrafiltration (EUF). The application of lime increased the pH in average from 6.6 up to 7.0 and 7.2, but did not decrease EUF extractable P and K below the level of untreated control. Contrary to our expectations, EUF extractable P increased 4 weeks after liming in the treatment with 3 t CaO ha⁻¹. At the end of incubation period 24 weeks after liming the EUF extractable K in treatment 12 t CaO ha⁻¹ remained still 1.3 mg K 100 g⁻¹ soil above the untreated control.

Keywords: calcium; phosphorus; potassium; nutrient interaction; soil analysis

Introduction

Liming agricultural farmland is of common practice where soils are either low in calcium (Ca) or low in pH or both. The regular application of lime is obligatory in order to maintain soil fertility. But liming is also known to affect plant availability of other nutrients in the soil (Truog 1948). Literature reveals conflicting results about the extractability of phosphorus (P) after liming, as reviewed by Haynes (1982). Whereas, Steffens (1994) extracted more P after raising the pH from 5.2 to 6.8, White and Taylor (1977) suggested the precipitation of basic Ca-phosphates at pH values greater than 5.5 having high phosphate concentrations. For potassium (K) the picture is likewise diverse (York et al. 1953) but for soils with a requirement for lime the extractability of K tended to decrease after liming (Várnai et al. 1985).

The interaction between lime and other nutrients is of particular interest in weakly acid or almost neutral soils where either a beneficial or a negative influence of lime may prevail. The knowledge about the interactions between lime and other nutrients on such soils is limited. Most research work was carried out on soils low in pH (Haynes 1982) or with high Ca carbonate contents (Wasner et al. 2001). Nevertheless, under the humid conditions of Central Europe the high yielding soils derived from loess frequently lack Ca due to leaching processes. Such loessial soils are present in all major cropping regions of Central Europe from France to the Hungarian plain; they cover as much as 20% of the European land surface (Scheib et al. 2014).

Fertilizer recommendation systems consider interactions between Ca or pH and other nutrients in the soil to some extent (VDLUFA 2002a); i.e. they regard naturally occurring (relatively) high pH values for the adoption of phosphate measurements. But so far, such interactions are not taken into account when soil analysis reveals a requirement for lime. Neither does soil analysis consider a requirement for lime for the calculation of the K recommendation.

Nutrient extraction from the soil using electro-ultrafiltration (EUF) has been proven to be a reliable measure for their plant availability. Németh (1985) refers to numerous field trials with a wide range of crops as basis for the calculation of fertilizer recommendations. Since then, the EUF recommendation system has been further developed and extended according to several scientific examinations (Ziegler 1989, Horn 1990, Yan 1992). It is of primary interest to achieve knowledge about the processes in soils in order to improve fertilizer recommendations for cultivated plants. Therefore, possible interactions between soil nutrients after liming loessial soils have to be described in the first place.



Figure 1: Location of 62 trial sites in Germany and Austria.



The present study aimed to determine (i) the effects of liming slightly acid and nearly neutral loess soils on the content of EUF extractable P and K and (ii) the change of possible effects over time after the application of lime. It was hypothesized that liming loessial soils causes a reduced extraction of both P and K. In the case of P the formation of Ca-phosphates was suspected due to the increase of pH and the addition of Ca^{2+} . The enhanced fixation of K was believed to occur due to the precipitation of iron (Fe) and aluminum (Al) hydroxy complexes and thus, a free access of K to the formerly blocked fixation sites (Várnai et al. 1985).

Material and methods

Field experiments

Field trials were conducted at 29 sites in 2010 and 33 sites in 2011 on predominantly loessial soils. The majority of the sites was located in German sugar beet growing areas, 5 trials in 2011 were conducted in Austria (Figure 1). The sites were chosen according to their requirement for lime as indicated by EUF Ca contents below $40 \text{ mg Ca } 100 \text{ g}^{-1}$ in the 2nd EUF fraction (Németh et al. 1989). The soil texture was dominated by a high

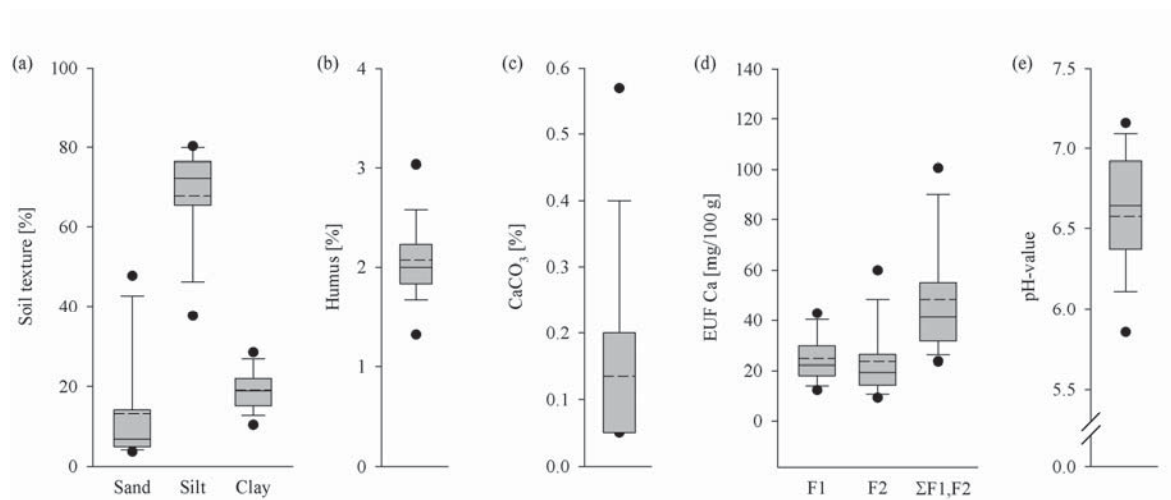


Figure 2: (a) Texture, (b) humus, (c) carbonate and (d) EUF extractable calcium (Ca) content and (e) pH in the top soil of 62 environments in Germany and Austria before lime application. Boxplots display the 5, 10, 25, 75, 90 and 95 percentile; the mean is depicted as the dashed line inside the box, the median as the solid line. F1 = 1st EUF fraction; F2 = 2nd EUF fraction.

proportion of silt (Figure 2a) reflecting their origin from loess, and representing predominately Luvisol soil type (Food and Agriculture Organization 2006). The soils had moderate humus and low Ca and Ca carbonate contents (Figure 2b-d). The initial pH value



ranged between pH 6.2 and 7.2 (Figure 2e). Figures 3a+b display the contents of P and K before trial establishment, the nutrient supply level is summarized in Table 1.

Three treatments of lime were tested. In addition to an untreated control (Ca00) two doses with 3 t CaO ha⁻¹ (Ca03) and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca12) were applied to 100 m² plots using burnt and ground lime (90% CaO). The lime treatments were applied after cereal grain harvest in late summer and replicated two (2010) and three (2011) times at each trial site. Neither catch crops nor commercial crops were cultivated during the duration of the trials. Soil tillage was carried out according to the farmers practice individually for the sites.

Soil samples were taken from every single plot 4, 8, 16 and 24 weeks after liming (wal). The following context refers to the incubation period as wal4, wal8, wal16 and wal24, respectively. Composite samples were taken in the centre of each plot from the top soil layer (0-30 cm) using a common soil probe (Ø 2 cm).

Soil analysis

The soil samples were dried at 40 °C for 72 hours and subsequently ground and sieved to 2 mm. The extraction of nutrients was carried out with 5 g of dry soil material using EUF (EUF 2000, HEITEC AG, Erlangen) with de-ionized water according to Németh (1979). Two fractions (F1, F2) of filtrate were taken off during extraction from both anode and cathode chamber. The 1st fraction represents the immediately available nutrients and lasted for 30 min with a maximum of 200 V and < 15 mA at 25 °C. The 2nd fraction represents the nutrient reserves and followed after the 1st fraction over 5 min with a maximum of 400 V and < 150 mA at 80 °C (VDLUFA 2002b).

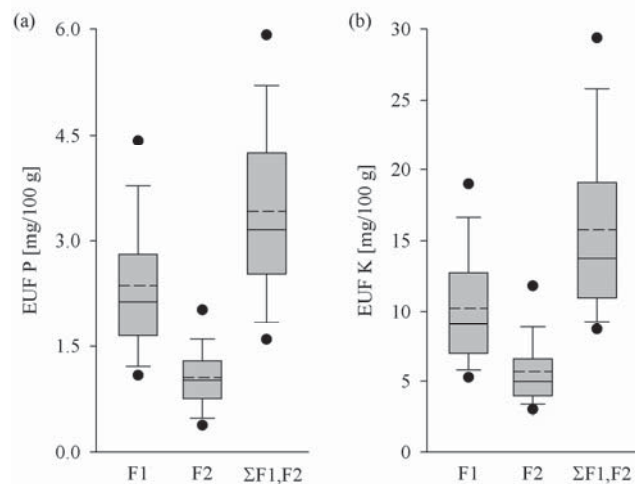


Figure 3: EUF extractable (a) phosphorus (P) and (b) potassium (K) content in the top soil of 62 environments in Germany and Austria before lime application. Boxplots display the 5., 10., 25., 75., 90. and 95. percentile; the mean is depicted as the dashed line inside the box, the median as the solid line. F1 = 1st EUF fraction; F2 = 2nd EUF fraction.

Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

Table 1: Number of trials in the respective nutrient supply level before trial establishment.

Level	Calcium*	Phosphorous	Potassium
A	48	7	0
B	-	22	4
C	8	21	43
D	-	9	8
E	6	3	7

Notes: A = insufficiently low; B = low; C = optimum/adequate; D = high; E = excessively high
* for calcium only three levels do apply.

The filtrate volumes were recorded and the P content of the filtrate was measured photometrically (Murphy & Riley 1962) using continuous-flow-technique (SKALAR Analytical B.V., Breda, Netherlands). The contents of K and Ca were determined by emission-spectrometry using inductively coupled plasma (ICP-OES, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Germany). The measured values were converted to mg nutrient per 100 g soil. The pH value was determined in a solution of 0.01 mol L⁻¹ calcium chloride.

Table 2: Analysis of variance (F-Test) for the two fractions (F1, F2) of EUF nutrients and anodic filtrate volume (AFV), and the sum of both fractions (Σ). The analysis included the treatments 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ for an incubation period of 4, 8, 16 and 24 weeks after liming of 62 environments.

Parameter	Treatment (T)	Incubation period (I)	T x I
Ca $\Sigma_{F1,F2}$	***	***	***
Ca _{F1}	***	***	***
Ca _{F2}	***	***	***
pH	***	***	***
P $\Sigma_{F1,F2}$	***	***	**
P _{F1}	***	n.s.	***
P _{F2}	***	***	**
K $\Sigma_{F1,F2}$	***	***	n.s.
K _{F1}	***	n.s.	n.s.
K _{F2}	***	***	*
AFV $\Sigma_{F1,F2}$	**	n.s.	n.s.
AFV _{F1}	***	n.s.	n.s.
AFV _{F2}	***	n.s.	n.s.

Notes: *, **, *** equals the level of significance at $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.001$, respectively.
n.s. = not significant



Statistical analysis

The effects of year and site could not be analyzed separately because different fields were used in each year. Furthermore, the trial series consisted only of two years. Thus, the combined effect of site by year was used resulting in 62 environments. The effects of environment and its interactions with treatment and incubation period were considered in the ANOVA as random effects. The two fractions as well as the sum of both fractions were evaluated separately.

Statistical analysis was carried out with SAS 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, USA). The MIXED model procedure considered the covariance structure by using the REPEATED statement (Piepho et al. 2004). The type of covariance structure was determined individually for each parameter iteratively according to the lowest Akaike Information Criterion. In order to achieve normal distribution and homogeneity of variance the data were transformed with exponents determined by the BOXCOX procedure and subsequently retransformed for presentation. Differences between the factor levels were compared using Tukey's test at $p \leq 0.05$.

Results and discussion

Environments and their interaction with treatment and incubation period were not considered in this paper for two reasons: First, the single environments were initially regarded as a measure of replication rather than a measure of variance, i.e. similar environments were chosen for the trial sites (Figure 2a-e). Second, the difference of treatment effects and effects of incubation period between environments was low. For the analysis of such differences a factor analysis with a subsequent cluster analysis will be applied to the data and presented in a separate paper.

After the application of lime all regarded parameters were affected either by treatment or incubation period, or the interaction of both (Table 2). The graphs uniformly present the interaction between treatment and incubation period (Figure 4a-d).

Calcium

The Ca content of the soil clearly reflected the amount of Ca added in the different lime treatments. In the untreated control the Ca content of the two EUF fractions as well as the sum of both fractions remained unchanged during the entire observation period (Figure 4a).



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

The treatments Ca03 and Ca12 substantially increased the Ca content in both EUF fractions.

In the 2nd fraction at wal4, the Ca content was raised from 23 (control) to 42 and 65 mg (100 g)⁻¹ in the treatments Ca03 and Ca12, respectively. In treatment Ca03 the apparent recovery of the applied Ca was almost 90%, whereas in Ca12 the apparent recovery was calculated to be 50% of the applied Ca. Obviously, the fourfold amount of applied Ca caused just a disproportionately lower increase by about the factor 1.5 in the 2nd fraction. This discrepancy is probably due to the deregulation of voltage in soils with high ion concentrations and thus, a high electric conductance (Németh 1985). For soils with an average pH_{H₂O} of 6.9 Pauler and Neumann (1999) described that cation extraction decreased due to the deregulation of voltage. The electric conductance increased after the addition of electrolyte solution to the soil suspension during EUF, voltage was deregulated and cation extraction from the 1st fraction was incomplete and shifted to the 2nd fraction. Appel and Horn (2010) confirmed the results of Pauler and Neumann (Pauler & Neumann 1999) for soils rich in Ca carbonate.

In addition to the deregulation with an incomplete extraction of Ca in treatment Ca12, the fate and the solubility of the applied lime has to be considered. According to MacIntire (1919) the carbonation of about 5 t CaO ha⁻¹ was almost completed 10 days after incorporation to moist soil. A small portion was accounted to the occlusion of Ca(OH)₂ in nuclei protected by film-coating of CaCO₃ and thus, delimiting further contact with moisture and CO₂ (MacIntire 1919). The occurrence of such nuclei can be assumed for treatment Ca12 due to the vast amount of applied lime. Hence, the low solubility of CaCO₃ contributed to the discrepancy between the proportion of extracted Ca from treatment Ca03 and Ca12.

The effect of incubation period was detected in both fractions of the treatments Ca03 and Ca12 at the same scale with a decreasing EUF Ca content of approximately 10 mg Ca 100 g⁻¹ between wal4 and wal24 after the initial increase, whereas such an effect was absent in treatment Ca00. As compared to the results of MacIntire (1919) the carbonization was completed at wal4, and due to the solving processes natural precipitation presumably has relocated Ca below the sampled 0-30 cm soil layer in the period from wal4 to wal24.

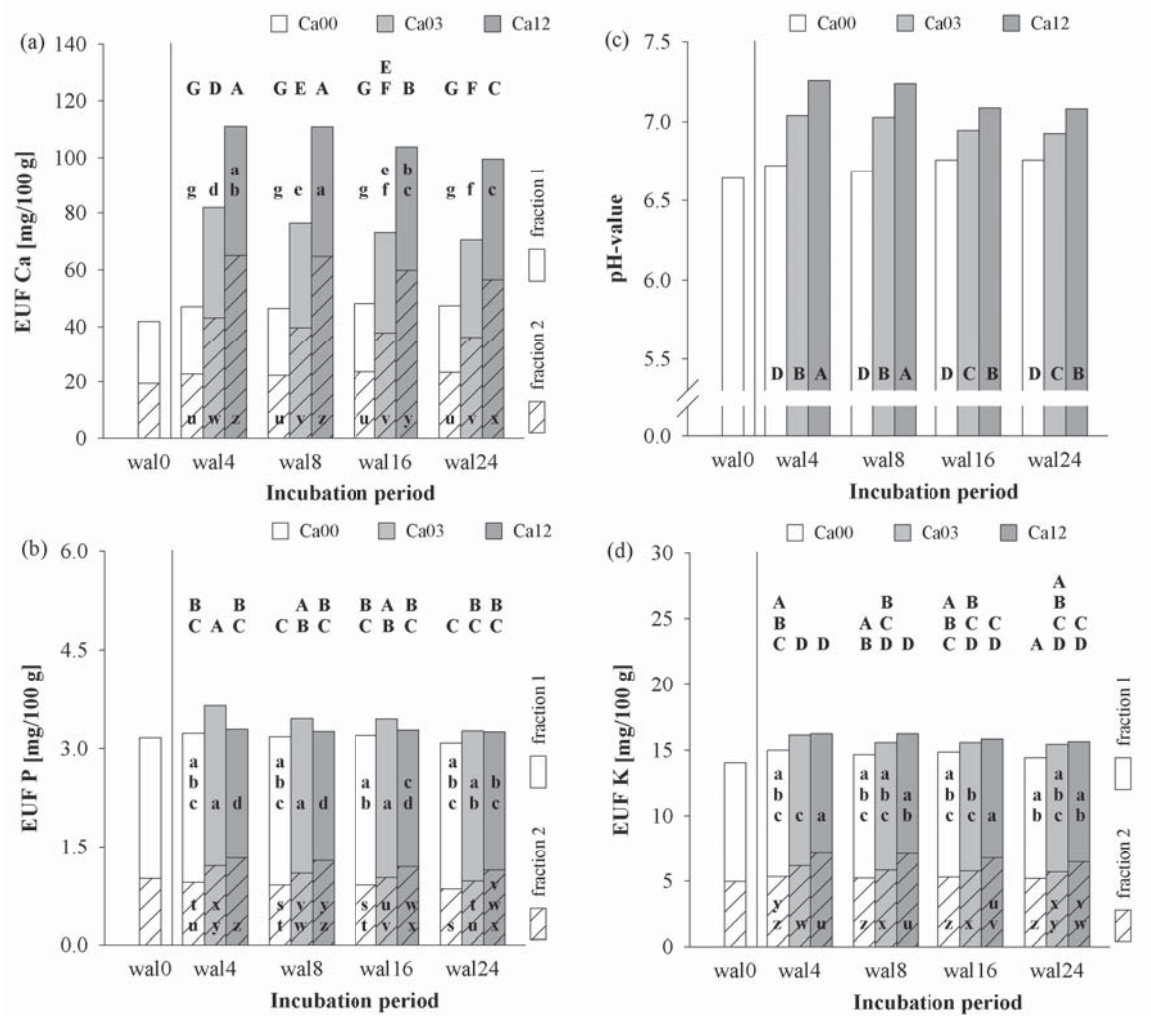


Figure 4: Effect of lime applied in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) and incubation period of 4, 8, 16 and 24 weeks after liming (wal4 - wal24) on EUF extractable nutrients (a) Ca, (b) P, (d) K and (c) pH in the top soil of 62 environments in Germany and Austria. The first column (wal0) represents the mean of one sample per replication and environment before application of lime. The data of wal0 were not included in the ANOVA. Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to the 1st and 2nd EUF fraction, respectively. Capital letters refer to the sum of both fractions.

Phosphorus

The application of lime caused a slight but significant increase of the EUF extractable P content in treatment Ca03 at wal4 and wal8 (Figure 4b). The increase was based on the 2nd fraction EUF P whereas the 1st fraction was not affected. The EUF P content of treatment Ca12 remained unchanged compared to Ca00, but P was shifted from the 1st to the 2nd fraction at wal4, wal8 and wal16. The increase of EUF P in the 2nd fraction due to the lime application in Ca03 occurred throughout the entire incubation period. The effect of incubation period with decreasing values in the course of time was detected only in the 2nd fraction.



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

On acid soils with a low initial pH it can be expected that extractable P increases after an application of lime (Haynes 1984). This is due to the increase of the pH, causing a desorption of P from Fe and Al oxides and hydroxides and the dissolution of Fe- and Al-phosphates (Haynes 1984). On the other hand, Haynes (1984) summarized that P fixation increased after liming soils to pH values near or above neutrality due to the formation of Ca-phosphates. Moreover, Barrow (1984) reported that sorption of P increased with an increasing pH for soils initially low in pH ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4 – 5.7). At low pH-values, phosphate is considered to be adsorbed specifically by ligand exchange onto metal hydrous oxide surfaces (Haynes 1982). With an increasing pH these surfaces become more negative and retention of P decreases. On the other hand, Haynes (1984) reviewed that P is preferentially adsorbed as the bivalent HPO_4^{2-} rather than the monovalent H_2PO_4^- ion. The dissociation of H_2PO_4^- to HPO_4^{2-} increases with the increasing $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 2 to 7. And thus, the change of ion concentration towards HPO_4^{2-} with the increasing pH may partially offset the increasing repulsion of P from the sorbant surfaces due to the increasingly negative surface charge with the increasing pH (Barrow 1984; Haynes 1984). However, Naidu et al. (1990) and Schachtschabel and Heinemann (1964) gave evidence that precipitated Ca-phosphates prevail when soil pH was above $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 6.5 and pH_{KCl} 6.0, and Ca was either added or present in the background electrolyte. All together, liming near neutral loess soils was expected to decrease, and not increase extractable P, as observed in treatment Ca03 of our study. Obviously, with the increasing pH after liming from $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 6.6 in Ca00 to $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 7.0 in Ca03 (Figure 4c) the desorption of P from Fe- and Al-oxides and -hydroxides and the dissolution of Fe- and Al-phosphates exceeded the formation of poorly soluble tertiary Ca-phosphates. Lemme (2014) confirmed our findings by analyzing similar soils with comparable amounts of added lime in pot trials.

In treatment Ca12 of our study there was no increase of EUF P due to the increase of pH as observed in Ca03. In parts this may be explained by the deregulation of voltage during EUF (Appel and Horn 2010) using soils with a high conductivity as already described above for the results of Ca and as indicated by the shift of EUF P from the 1st to the 2nd fraction in Ca12 until wall6. However, the results of Lemme (2014) suggested that adsorption of P increased with increasing pH in the presence of high amounts of Ca. Thereby, the desorption of P due to the increasing pH was counteracted and furthermore exceeded as described by Helyar et al. (1976) and Barrow (1984). Lemme (2014) observed in the treatment with an equivalent amount of 24 t CaO ha^{-1} that the P content of his P-fractioned



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

soil decreased in the H₂O-P-fraction and increased in the NaHCO₃-P-fraction; moreover, the P content of the HCl-P-fraction was not raised. Thus, a precipitation of slowly dissolvable Ca-phosphates can be ruled out, as well as for our treatment Ca12.

Table 3: Anodic filtrate volume (AFV) for the two EUF fractions (F1, F2) and the sum of both fractions (Σ) in the three lime treatments 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03 and Ca12). Mean of 62 environments and four sampling dates.

	Ca00	Ca03	Ca12
AFV $\Sigma_{F1,F2}$	63,1 ^a	61,4 ^b	62,7 ^a
AFV _{F1}	53,3 ^b	52,9 ^b	55,3 ^a
AFV _{F2}	9,73 ^a	8,52 ^b	7,46 ^c

Note: Means in rows with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$

The decrease of EUF P in the 2nd fraction at the end of the observation period (wal24) was slight but significant and can be explained by equalization processes. Natural acidification and precipitation caused Ca to leach from the top soil layer. Thereby, the increase of pH after liming decreased until wal24 (Figure 4c) and revoked to some extent the initially occurred change in the solution and sorption of P. The total P content at wal24 was balanced out between the treatments on the initial level of Ca00 at wal4. The shift of P from the 1st fraction to the 2nd fraction in Ca12 remained as a tendency but was not significant anymore.

The application of lime increased (F1, Ca12 only) or decreased the anodic filtrate volume (F2, Table 3). Németh (1976) found, that the amount of extracted P increased with an increasing amount of anodic filtrate by variation of the vacuum during EUF. Furthermore, he described that the filtrate volume at the anode decreased with an increasing clay content. Therefore, Németh (1976) introduced a factor for the adaptation of the P content in relation to the anodic filtrate volume extracted from the soil. However, in our study the magnitude of the effect of lime on the anodic filtrate volume was very small. Moreover, the effects of lime application on the anodic filtrate volume were inconsistent and not able to provide an explanation for the effect of lime on the P content.

Potassium

Lime application caused an increase of the K content of both treatments at wal4 (Figure 4d). Throughout the incubation period the K content of the 2nd EUF fraction increased with increasing amounts of applied lime. The K content of the 1st fraction at wal4 was significantly higher in Ca03 than in Ca12 but both Ca03 and Ca12 were statistically



equal to Ca00. At the end of the incubation period (wal24) the 1st fraction of Ca03 and Ca12 did not differ from Ca00, and the total K content remained only in treatment Ca12 significantly above Ca00 (Figure 4d).

The increase of EUF K in the limed treatments was based on an increase in the 2nd EUF fraction. The 2nd fraction determines the K that is released from interlayer binding sites of soils rich in 2:1 layer silicates (Németh 1976; Mengel 1988). The application of lime obviously caused an expansion of the interlayer space of those clay minerals (Rich 1964; Rich & Black 1964). Thus, the availability of K for extraction processes was enhanced after penetration of large hydrated cations, such as Ca, into the interlayer spaces, propping them apart (Sawhney 1972; Jackson & During 1979). The picture of K forms in the soil has somewhat changed during the last decades. The pools of K in the soil solution and the exchangeable K were and still are the basis for the majority of fertilizer recommendations (Römheld & Kirkby 2010). But the pool of non-exchangeable K (Mengel & Kirkby 1980) has to be regarded as fixed K and structural K (Sparks 1987). Increasing evidence of a significant contribution of fixed or non-exchangeable K to plant nutrition, especially in soils containing higher portions of 2:1 layer silicates (Hinsinger & Jaillard 1993; Mengel et al. 1998; Wang et al. 2000) lead to the declaration of slowly exchangeable K (Syers 2003). The results of the present study indicate that lime has a beneficial effect on the extractability of slowly exchangeable K up to wal4.

The effect of a deregulation of voltage during the EUF extraction is obvious in treatment Ca12 at wal4 and wal16. Having equal amounts of total K, the extracted K in Ca12 in comparison to Ca03 was lower in the 1st but higher in the 2nd fraction giving evidence of the deregulation due to the shift of extracted nutrients from the 1st to the 2nd fraction as described already for Ca.

The effect of the interaction between treatment and incubation period was poor (Table 2) and only visible in the 2nd EUF fraction (Figure 4d). Whereas the 2nd K fraction of treatment Ca00 remained unchanged, the K content of Ca03 and Ca12 increased at wal4 and decreased slightly until wal24. The process of natural restoration after lime application obviously affected K to a lesser extent than Ca (Figure 4a). This was probably due to the number of specific sorption sites in the used loess soils that were able to retain rather K than Ca.



The proposed fixation of K as described by Várnai et al. (1985) was not found after liming in the present study, neither directly after the application of lime nor at wal24.

Conclusion

The most obvious result of our study was that in contrast to our assumption, the application of a practically relevant amount of 3 t CaO ha⁻¹ to near neutral loess soils had no negative effect on the extractability of neither EUF P nor EUF K but rather a positive one. However, the small magnitude of the observed effects raised the question whether single environments or groups of environments could present a clearer picture of the influence of lime on the EUF extractable nutrients than other environments or groups of environments. This question will be considered in a subsequent paper.

References

- Appel T, Horn C. 2010. Bodenfingerprints bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF) zur Optimierung der Düngeempfehlung [Soil fingerprints with electro-ultrafiltration (EUF) for the improvement of fertilizer recommendations]. Final Report. Bingen. Germany: Fachhochschule Bingen.
- Barrow NJ. 1984. Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. *J Soil Sci.* 35:283–297.
- Food and Agriculture Organization. 2006. World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication. Rome, Italy: FAO.
- Haynes RJ. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil.* 68:289–308.
- Haynes RJ. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv Agron.* 37:249–315.
- Helyar KR, Munns DN, Bureau RG. 1976. Adsorption of phosphate by gibbsite. I. Effects of neutral chloride salts of calcium, magnesium, sodium and potassium. *J Soil Sci.* 27:307–314.
- Hinsinger PH, Jaillard B. 1993. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. *J Soil Sci.* 44:525–534.



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

- Horn D. 1990. Die Erstellung eines Stickstoffdüngemodells für Mais auf Basis von Feldversuchen und der Elektro-Ultrafiltrationsmethode [Calculation of a fertilization model for nitrogen in maize on the basis of field trials and electro-ultrafiltration] [dissertation]. Giessen, Germany: Justus-Liebig-University.
- Jackson BLJ, Dearing C. 1979. Studies of slowly available potassium in soils of New Zealand I. Effects of leaching, temperature and potassium depletion on the equilibrium concentration of potassium in solution. *Plant Soil*. 51:197–204.
- Lemme H. 2014. Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares und pflanzenverfügbares Phosphat sowie Phosphatfraktionen des Bodens [Effect of liming on EUF extractable and plant available phosphate and phosphate fractions of soils] [dissertation]. Göttingen; Germany: Georg-August-Universität.
- MacIntire WH. 1919. The carbonation of burnt lime in soils. *Soil Sci*. 7:325–453.
- Mengel K, Kirkby EA. 1980. Potassium in crop production. *Adv Agron*. 33:59–110.
- Mengel K, Rahmatullah X, Dou H. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Sci*. 163:805–813.
- Mengel K. 1988. Wissenschaftliche Grundlagen der EUF-Kalium- und Kalzium-Untersuchung und der entsprechenden Empfehlungen [Scientific principles of the EUF potassium and calcium analysis and respective recommendations]. In: Süddeutsche Zucker-AG, editor. *Kostensenkung und Umweltschutz. Proceedings of the 3rd Intern. EUF-Symposium*; Mannheim. Germany.
- Murphy J, Riley JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chim Acta*. 27:31–36.
- Naidu R, Syers JK, Tillman RW, Kirkman JH. 1990. Effect of liming on phosphate sorption by acid soils. *J Soil Sci*. 41:165–175.
- Németh K, Bartels H, Heuer C, Ziegler K. 1989. Kalkbedarf mittels EUF sicher und genau beurteilen [Precise and definite determination of the lime requirement using EUF]. *Zuckerindustrie*. 114:336–338.



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

- Németh K. 1976. Die effektive und potentielle Nährstoffverfügbarkeit im Boden und ihre Bestimmung mit Elektro-Ultrafiltration (EUF) [The effective and potential nutrient availability in the soil and its determination using electro-ultrafiltration (EUF)] [habilitation]. Gießen, Germany: Justus-Liebig-Universität..
- Németh K. 1979. The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Adv Agron.* 31:155–188.
- Németh K. 1985. Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant Soil.* 83:1–19.
- Pauler B, Neumann K-H. 1999. Methodische Untersuchungen zum Extraktionsverhalten der Elektro-Ultrafiltration unter kontinuierlicher Registrierung der elektrischen Betriebsfaktoren [Methodological assessment of the extraction procedure of electro-ultrafiltration under constant recording of the electric extraction parameters] [Internet]. Gießen: Gießener Elektron Bibl; [cited 2012 Feb 10]. Available from: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/1999/128/>. Germany.
- Piepho HP, Büchse A, Richter C. 2004. A mixed modelling approach for randomized experiments with repeated measures. *J Agron Crop Sci.* 190:230–247.
- Rich CI, Black WR. 1964. Potassium exchange as affected by cation size, pH, and mineral structure. *Soil Sci.* 97:384–390.
- Rich CI. 1964. Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil. *Soil Sci.* 98:100–106.
- Römheld V, Kirkby EA. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil.* 335:155–180.
- Sawhney BL. 1972. Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays Clay Miner.* 20:93–100.
- Schachtschabel P, Heinemann G. 1964. Beziehungen zwischen P-Bindungsart und pH-Wert bei Lössböden [Relationships between the kind of P-binding and the pH-value of loess soils]. *Z Pflernähr Düng Bodenk.* 105:1–13. Germany.
- Scheib AJ, Birke M, Dinelli E, GEMAS Project Team. 2014. Geochemical evidence of aeolian deposits in European soils. *Boreas.* 43:175–192.
- Sparks DL. 1987. Potassium dynamics in soils. *Adv Soil Sci.* 6:1–63.



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

- Steffens D. 1994. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. *Soil Sci Soc Am J.* 58:1702-1708.
- Syers JK. 2003. Potassium in soils: Current concepts. In: Johnston AE, editor. *Feed the soil to feed the people. Role of potash in sustainable agriculture. Proceedings of the IPI Golden Jubilee Congress 1952-2002; 2002 Oct 8-10; Basel. (Switzerland) International Potash Institute.*
- Truog E. 1948. Lime in relation to availability of plant nutrients. *Soil Sci.* 65:1–8.
- Várnai M, Eifert J, Szöke L. 1985. Effect of liming on EUF-nutrient fractions in the soil, on nutrient contents of grape leaves and on grape yield. *Plant Soil.* 83:55–63.
- VDLUFA. 2002a. Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat–Lactat–Auszug, A 6.2.1.1 [Determination of phosphorus and potassium in calcium-acetate–lactate–extraction, A 6.2.1.1]. In: *VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.* Darmstadt; Germany: VDLUFA Verlag
- VDLUFA. 2002b. Bestimmung der durch Elektro-Ultrafiltration löslichen Anteile von Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Natrium, Schwefel und Bor, A 6.4.2 [Determination of the by electro-ultrafiltration soluble portions of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, sulfur and boron, A 6.4.2] In: *VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.* Darmstadt, Germany: VDLUFA-Verlag.
- Wang JG, Zhang FS, Cao YP, Zhang XL. 2000. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 56:37–44.
- Wasner J, Liebhard P, Eigner H. 2001. Ausbringung von Carbokalk auf Ackerböden mit hohem pH-Wert im pannonischen Anbaugebiet Österreichs [Application of carbonation lime to farmland with high pH-values in the Pannonian cultivation area of Austria]. *Sugar Ind.* 126:194–201.



Artikel 1: Effect of lime on soil phosphorus and potassium

- White RE, Taylor AW. 1977. Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at high and low additions of soluble phosphate. *J Soil Sci.* 28:48-61.
- Yan F. 1992. Erstellung eines Kalkdüngemodells für Gerste mittels Elektro-Ultrafiltrationsmethode sowie die Bedeutung des Calciums für Pflanzenwachstum auf sauren Böden [Calculation of a fertilization model for lime in barley using electro-ultrafiltration and the importance of calcium for plant growth on acid soils] [dissertation]. GiessenGermany: Justus-Liebig-Universität.
- York ET, Bradfield R, Peech M. 1953. Calcium-potassium interactions in soils and plants: I. Lime-induced potassium fixation in mardin silt loam. *Soil Sci.* 379–387.
- Ziegler K. 1989. Feldversuche zur Ermittlung der Stickstoffverfügbarkeit fränkischer Ackerböden zur weiteren Eichung des EUF-Verfahrens im Getreidebau [Field trials for the determination of the nitrogen availability of arable soils in Franconia for further calibrations of the EUF-method in cereal cropping] [dissertation]. Giessen: Germany: Justus-Liebig-Universität.



III. Artikel 2

Multivariate approach to predict the effect of liming on extractable phosphorus and potassium on loess soils with pH close to 7

Sven Fischer, Heinz-Josef Koch, Dietmar Horn, Bernward Märländer

Abstract

Lime application affects plant availability of other nutrients in the soil due to the increase in pH and calcium (Ca) concentration. Such effects are of particular relevance for giving correct fertilizer recommendations. Especially for nearly neutral soils, there is no scientific consent about the response of plant available phosphorus (P) and potassium (K) to a lime application. The present study examined the effect of liming on electro-ultrafiltration (EUF) extractable P and K on the basis of field trials with three rates of lime (0, 3 and 12 t ha⁻¹) at 62 environments with nearly neutral loess soils in the main cropping regions of Germany and Austria. In a first step, four principle components (PC) were determined from soil parameters measured before trial establishment. Subsequently, the environments were clustered using cluster and discriminant analysis on the basis of the four previously extracted PCs, resulting in six different clusters. In the second step, the results from soil analysis 24 weeks after liming were subjected to ANOVAs under consideration of the previously assigned clusters. Furthermore, two groups of clusters with different levels of the PC buffer capacity were regarded. Thereby, the application of lime had an increasing effect on the extractability of P and K in soils with lower buffer capacity. Soils with an initially higher buffer capacity did not significantly respond to liming, but extractability of P tended to decrease. In conclusion, integrating the site specific buffer capacity as measured by the EUF Ca content before liming offers the potential to improve the prediction of the effect of liming on the extractability of EUF P and thus, the fertilizer dose required for maximum yield.

Keywords: Calcium, Principle component analysis, Cluster analysis, Nutrient interaction, Fertilizer recommendation, Electro-ultrafiltration (EUF)



1. Introduction

The impact of lime application on extractability and plant availability of nutrients in the soil is well known but controversially discussed in literature as reviewed by *Haynes* (1984) for phosphorus (P). Most research work on the effect of lime on other nutrients was carried out using acid soils (*Haynes*, 1982; *Jaskulska et al.*, 2014; *Kreutzer*, 1995). Some works referred to alkaline soils (*Baraldi et al.*, 2006; *Wasner et al.*, 2001), but only few researchers studied the effects for neutral or nearly neutral soils (*Grass and Budig*, 1976; *Scheffer and Scheffer*, 1984), although these soils have a high importance for an efficient crop production with high yields in central Europe. However, these central European loess soils frequently lack calcium (Ca) despite having near neutral pH values and therefore, require lime for the maintenance of soil structure and soil fertility (*Haynes and Naidu*, 1998; *Zhang and Norton*, 2002).

In principle, the availability of P is dependent on soil pH (*Barrow*, 1984; *Lemme*, 2014). Liming acid soils increases the pH and thereby, decreases sorption of P to iron (Fe) and aluminum (Al) ligands (*Haynes*, 1982; *Scheffer et al.*, 1980). On the other hand, the availability of P decreases with high Ca concentrations in the soil due to an increased sorption of P to Ca and/or an increased precipitation of Ca-phosphates (*Barrow*, 1984; *Haynes*, 1984). In the presence of potassium (K) bearing minerals such as illite, the extractability of K increases with the delivery of Ca ions due to liming by displacing K from exchange sites (*Beckett and Nafady*, 1967). However, plant availability of K may decrease due to ion antagonisms with excess Ca after liming (*Ehrenberg*, 1920; *Mengel and Kirkby*, 2001).

The differentiation between extractability and plant availability of nutrients is important and frequently discussed in the context of soil analysis and plant nutrition. For the extraction methods Ca-acetate-lactate (CAL) and electro-ultrafiltration (EUF) the correlation between extractable nutrients and fertilizer requirements was proven in field fertilization trials (*Orlovius*, 1988; *Rex and Munk*, 1988; *VDLUF*A, 1997). Therefore, we assume in the following context that EUF extracted nutrients are plant available.

The knowledge about the effects of liming on other nutrients in the soil is essential for the calculation of fertilizer recommendations on the basis of soil analysis. At present, interactions between nutrients, or between nutrients and other soil parameters, are only considered in fertilizer recommendations for P. For instance in Germany, the pH value is



Artikel 2: Predict the effect of liming

used for the adaptation of the recommended amount of P. Thereby, the measured P content after extraction with CAL is raised by calculation for soils with $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} \geq 7.1$ (VDLUF, 2002a). Similarly, the EUF based fertilizer recommendation for P applies a correction function for the P content when the soil Ca content exceeds $65 \text{ mg (100 g)}^{-1}$ in the second EUF fraction (Appel and Horn, 2010; Horn et al., 2009). However, both ways regard the present state of the soil at sampling time and do not consider effects of a recommended liming in future due to a low Ca content or low pH.

As an approach to this subject, Fischer et al. (2015a) conducted field trials in order to determine the effect of liming on nearly neutral loess soils deficient in Ca. Four weeks after the application of lime to 62 largely similar loess soils they found a slight but significant increase of P and K extracted by EUF. However, on average across all trial environments the effect was only weak and decreased over time. Therefore, Fischer et al. (2015a) suggested that single environments or groups of environments could display a clearer picture of the influence of lime on EUF extractable nutrients and thus, proposed an examination of the results under consideration of a grouping of environments.

Using the data of Fischer et al. (2015a), the present study aimed at analyzing whether single environments or groups of environments are distinct in their response to lime regarding EUF extractable P and K. Moreover, it was studied whether it is possible to identify those environments at which liming will affect extractability of other soil nutrients. The knowledge about differences in the response of apparently similar soils to a lime application could improve the precision of fertilizer recommendations considerably.

The investigation was carried out in two steps. In the first step, environments were grouped on the basis of results from soil samples analyzed before lime application. In the second step the results of soil samples taken after liming were evaluated under consideration of the previously assigned groups. Thereby, the focus was set on the distinction of groups and the recognition of different treatment effects within the groups. The effect of treatment on average across all environments was neglected because it was already presented in detail by Fischer et al. (2015a).



2. Material and methods

2.1. Data base

Field experiments were conducted at 29 sites in 2010 and 33 sites in 2011 in high-yielding regions of Germany and Austria, predominantly on loess soils. The trial locations were chosen with regard to low Ca contents after analysis of soil samples from the top soil layer (0-30 cm) before trial establishment. These soil samples were subject of a detailed analysis and the following parameters were determined: EUF nutrient contents and filtrate volumes (*VDLUFA*, 2002b), soil texture (*DIN ISO 11277*, 1998), potential cation exchange capacity and base saturation (*DIN ISO 11260*, 1994), $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ (*VDLUFA*, 1991) and the contents of calcium carbonate (*DIN ISO 10693*, 1997), humus, total nitrogen and total carbon (*DIN ISO 10694*, 1996). Similar sites with mostly Luvisols (*Food and Agriculture Organization*, 2014) were chosen with regard to their low Ca contents. The similarity of the trial locations was intended because initially, the sites were regarded as a measure of replication rather than a measure of variance.

The trials consisted of three treatments. In addition to an untreated control, burnt and ground lime (90% CaO) was applied in amounts of 3 and 12 t CaO ha⁻¹ to 100 m² plots in two (2010) and three (2011) replications at each site. The lime was spread in summer after cereal harvest. Catch crops and commercial crops were not cultivated until spring. Tillage was done according to the farmers practice. After one or two cultivator operations (8-25 cm deep), at one third of the sites the soil was mouldboard ploughed (25-30 cm deep).

In spring before spring crop cultivation and 24 weeks after liming, a composite soil sample was mixed from ten sub samples, taken from the top soil layer (0-30 cm) in the centre of each plot. Nutrient contents were determined for the extracted fractions F1 and F2 according to EUF (*VDLUFA*, 2002b), and the pH value was measured in a solution of 0.01 mol L⁻¹ Ca chloride (*VDLUFA*, 1991).

A detailed description of the trial setup and performance is given by *Fischer et al.* (2015a).

2.2. Statistical analysis

Different sites were used in each year. Thus, the effect of site and year could not be evaluated separately. Subsequently, the combination of site by year was used referred to as environments. The statistical evaluation was carried out in two steps using the software package SAS 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Step one comprised the assignment



of individual environments to groups of environments and was based on a principle component analysis (PCA), a hierarchical cluster analysis (CA) and a discriminant analysis (DA). The first step was done using data of the soil analysis before trial establishment. In a second step an analysis of variance (ANOVA) was applied to the data of the soil analysis 24 weeks after liming.

2.2.1. Principle component-, cluster- and discriminant analysis

30 parameters (variables) were determined for each soil sample taken before trial establishment (section 2.1.). The first task of the statistical evaluation was to condense data and to reduce dimensions. For that purpose, a PCA was carried out with all initial 30 variables using Proc FACTOR. The results of the PCA were enhanced in an iterative process by excluding variables with (i) measures of sampling adequacy (MSA) < 0.6 or (ii) factor loadings between -0.6 and $+0.6$ for each of the extracted factors (Table 1) (Kaiser, 1970). Factors (principle components) with eigenvalues ≥ 1 were extracted (Kaiser, 1960) and subsequently rotated using the VARIMAX option for orthogonal rotation (Kaiser, 1958; Kaiser, 1959). The final communality estimates (h^2) were calculated as the sum of the squared factor loadings individually for each variable which was included in the PCA (Backhaus et al., 2010). Factor scores were calculated for each principle component (PC) in each environment (Proc SCORE) and the PCs were standardized with a mean of 0 and variance of 1 for further analysis (Proc STANDARD).

Principle components were interpreted individually by considering only those variables with factor loadings $\geq +0.6$ or ≤ -0.6 . Variables with lower factor loadings were regarded as less important.

On the basis of the factor scores a CA was performed (Proc CLUSTER) using Ward's minimum-variance (Ward, 1963) as the method for the calculation of distances between clusters. For the removal of outliers (TRIM option) densities were estimated by the k th-nearest-neighbor method (Wong and Lane, 1983). The final number of clusters was determined after calculation of three different stopping rules: cubic cluster criterion (CCC), pseudo F statistic (PSF) and pseudo t^2 statistic (PST2) (Calinski and Harabasz, 1974; Sarle, 1983; SAS Institute Inc., 2011).

In an iterative process, the DA (Proc DISCRIM) including the CROSSVALIDATE option was used to investigate and rearrange classification of environments into clusters (SAS Institute Inc., 2011).



Table 1: The measure of sampling adequacy (MSA), rotated factor loadings and final communality estimates (h^2) after principle component analysis on the basis of soil analysis data before trial establishment from 62 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).

Variable	MSA	Factor loadings for principle components				h^2
		PC1	PC2	PC3	PC4	
EUJ ^a anode filtrate volume F1 ^b [mL]	0.75	0.84	-0.01	-0.23	-0.29	0.84
EUJ anode filtrate volume F2 ^c [mL]	0.81	0.84	-0.06	-0.31	-0.25	0.86
EUJ P _{F2} [mg (100 g) ⁻¹]	0.67	0.63	0.04	0.11	0.26	0.48
Potential cation exchange capacity [cmol _c kg ⁻¹]	0.92	-0.70	0.29	0.25	0.20	0.67
Clay [%]	0.80	-0.79	-0.02	0.23	0.28	0.75
Humus [%]	0.84	-0.11	0.93	0.00	0.25	0.93
Total carbon [%]	0.71	-0.10	0.90	0.14	0.17	0.87
Total nitrogen [%]	0.72	-0.18	0.89	0.08	0.32	0.94
EUJ N _{org} [mg (100 g) ⁻¹]	0.79	0.44	0.60	0.14	0.09	0.58
EUJ Ca _{F1} [mg (100 g) ⁻¹]	0.65	-0.14	0.08	0.93	0.08	0.90
EUJ Ca _{F2} [mg (100 g) ⁻¹]	0.67	-0.21	0.11	0.90	0.11	0.88
pH	0.66	-0.30	-0.26	0.69	-0.02	0.63
Base saturation Ca [cmol _c kg ⁻¹]	0.83	-0.58	0.20	0.64	0.06	0.79
Ca-carbonate [%]	0.79	0.05	0.24	0.60	0.09	0.43
EUJ K _{F1} [mg (100 g) ⁻¹]	0.68	-0.01	0.27	0.02	0.94	0.95
Base saturation K [cmol _c kg ⁻¹]	0.81	-0.19	0.23	0.06	0.89	0.88
EUJ K _{F2} [mg (100 g) ⁻¹]	0.76	-0.30	0.30	0.21	0.83	0.92
Share of explained variance [%]		49	25	14	10	
Cumulative share of explained variance [%]		49	74	88	98	

^a EUJ = electro-ultrafiltration

^b F1 = first fraction

^c F2 = second fraction



2.2.2. Analysis of variance

After assignment of the individual environments to the corresponding clusters a two factorial ANOVA was applied to the data from soil analysis 24 weeks after liming. Treatment and cluster as well as their interaction were regarded as fixed factors (Proc MIXED). The EUF parameters of Ca, P and K contents and pH were tested. As the EUF method is used to analyse two nutrient fractions (F1, F2) differing in their plant availability (Németh, 1985), the two EUF nutrient fractions as well as the sum of both fractions ($\Sigma F1, F2$) were evaluated separately.

A second ANOVA was calculated for the same parameters after grouping the clusters C1 – C3 and C6 (G1236) versus the clusters C4 and C5 (G45). The two groups of clusters were arranged on the basis of PC3 (Fig. 1) and after evaluation of the results from the first ANOVA. Thereby, G1236 comprised clusters with lower scores for PC3.

In order to ensure normal distribution and homogeneity of variance the data were transformed with exponents determined by the BOXCOX procedure and were subsequently retransformed for presentation. Differences between factor levels were compared using Tukey's test at $p \leq 0.05$.

Pearson's correlation coefficients were calculated with Proc CORR using the differences between EUF nutrient contents of limed treatments (Ca03, Ca12) and Ca00, subsequently abbreviated with the Greek letter Δ . The correlations of the nutrient contents 24 weeks after liming were calculated versus PC3, EUF Ca_{F1} and EUF Ca_{F2} as determined before trial establishment. Linear regressions and confidence intervals were presented using Sigma Plot 11.0 (Systat Software Inc., Chicago, US-IL).

3. Results

3.1. Classification of trial sites

The PCA resulted in an overall MSA of 0.76 after 13 variables with low MSA or low factor loadings were excluded from the analysis with initially 30 variables. Four PCs with eigenvalues ≥ 1 were extracted explaining altogether 98% of the total variance of the included variables (Table 1). The PC1 represented 49% of the total variance and expressed *soil texture* due to the loading variables EUF filtrate volume, EUF P_{F2}, potential cation exchange capacity and clay content. The PC2 was responsible for 25% of the total variance and was interpreted as *organic potential*. Principle component 3 and 4 were regarded as

Artikel 2: Predict the effect of liming

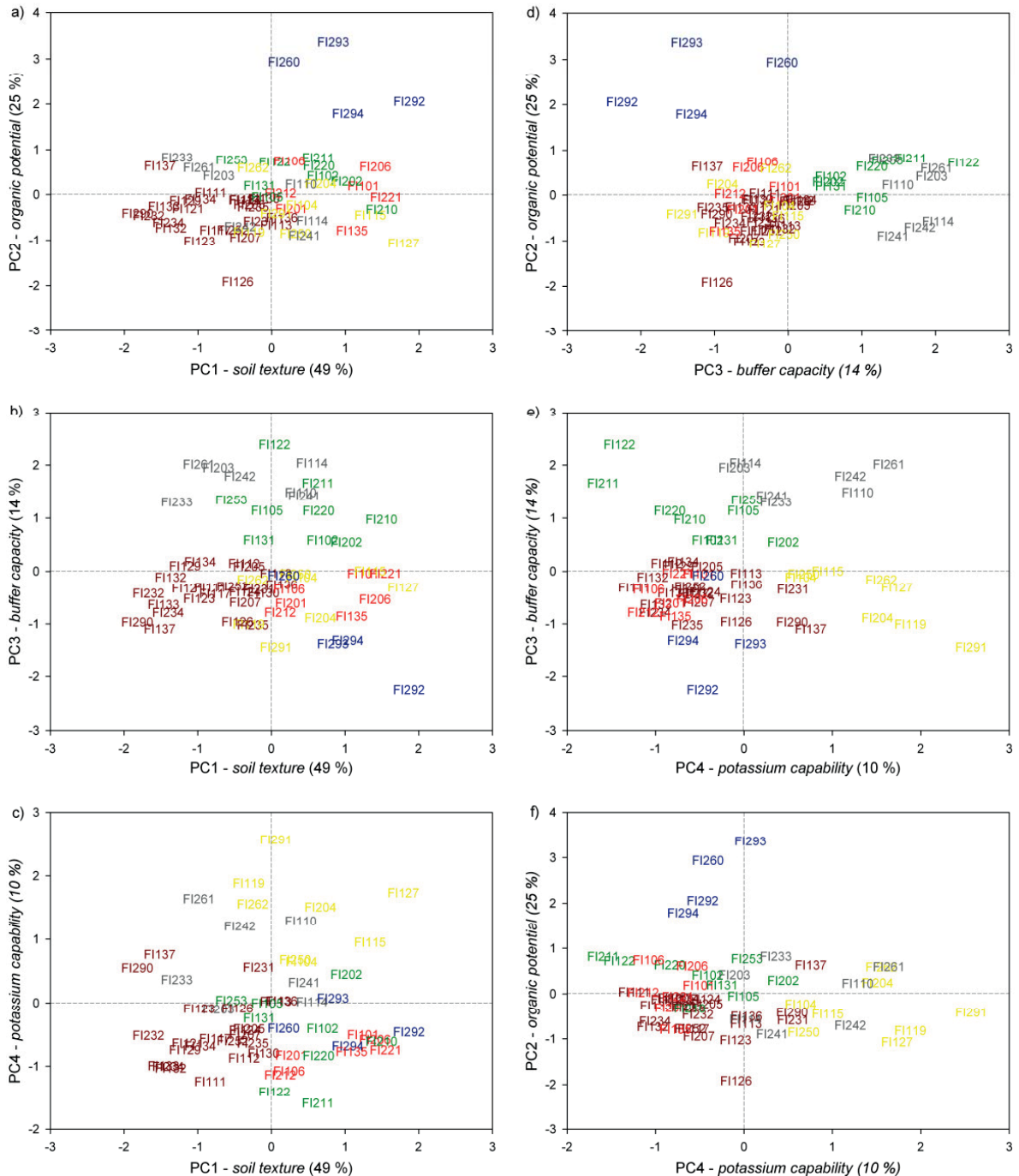


Figure 1: Bivariate plots of the principle component analysis of 17 parameters from soil analysis of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Different colors represent different clusters – brown (C1), yellow (C2), red (C3), green (C4), grey (C5) and blue (C6). Principle components (PC) were interpreted as soil texture (PC1), organic potential (PC2), buffer capacity (PC3) and potassium capability (PC4) (Table 4).

buffer capacity and potassium capability representing 14% and 10% of the total variance, respectively. The amount of described variance, which is given by the four extracted PCs in total for each input variable as expressed by the communality values (h^2), ranged between 43% and 95%.



Artikel 2: Predict the effect of liming

The CA calculated the peak CCC with 0.51 for the 6 cluster solution (Table 2). Both the PSF and the PST2 value were likewise favorable for 6 clusters. With an R-square (RSQ) value of 0.68 approximately two thirds of the variation were explained by this particular clustering of the environments. Four environments were identified as outliers and removed from further examination. Thus, 58 environments remained for DA and the subsequently calculated ANOVA (section 3.2). The DA improved the result of the CA from 87.9% correctly classified environments up to 98.3% after the second reclassification step (Table 3).

Table 2: History of cluster analysis with the respective R-square statistic (RSQ), cubic cluster criterion (CCC), pseudo F statistic (PSF) and pseudo t^2 statistic (PST2) on the basis of soil analysis results before trial establishment from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).

No. of clusters	RSQ	CCC	PSF	PST2
8	0.74	0.40	20.4	5.20
7	0.71	0.47	21.0	8.40
6	0.68	0.51	21.8	6.80
5	0.63	0.20	22.0	7.70
4	0.54	-0.38	21.4	17.2
3	0.40	-1.10	18.3	18.4
2	0.21	-1.40	15.2	16.5
1	0.00	0.00	.	15.2

The results of the classification of the environments were summarized in bivariate plots (Fig. 1). For instance, C6 (blue) included environments with a higher *organic potential* than all other clusters. But whereas C6 comprised environments with light soils, it did not differ from the red cluster (C3). Taking into account the interpretation of the PCs, properties can be assigned to each cluster (Table 4). The brown cluster (C1) comprised environments with heavy soils and with a relatively lower *organic potential*, *buffer capacity* and *potassium capability* as compared to the other environments. The red cluster (C3) included similar environments as C1, except for their *soil texture*. Hence, C1 clustered environments with heavy soils, whereas C3 clustered environments with light soils. Similar to C3, the yellow cluster (C2) comprised environments with light

Table 3: History of the iterative discriminant analysis and the number of environments classified per cluster with the respective share of correctly classified environments. Data base were results from soil analysis before trial establishment of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).

Base of discriminant analysis	Cluster						Share of correctly classified environments [%]
	1	2	3	4	5	6	
Cluster analysis	17	12	10	9	6	4	87.9
1. Reclassification	21	9	8	10	6	4	94.8
2. Reclassification	23	8	7	9	7	4	98.3
3. Reclassification	24	8	6	9	7	4	96.6

soils, a lower *organic potential* and a lower *buffer capacity*, but the clusters differed in their *potassium capability*. Finally, the environments in the green (C4) and the grey (C5) cluster could be distinguished from the other environments by a higher *buffer capacity*.

Table 4: Description of cluster properties according to the principle components PC1 – PC4 in relation to the range of the properties at the trial sites in the respective cluster C1 – C6. Data base were results from soil analysis before trial establishment of 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).

Cluster	Color ^a	PC1	PC2	PC3	PC4
		Soil texture	Organic potential	Buffer capacity	Potassium capability
C1	brown	heavy	low	lower	lower
C2	yellow	lighter	lower	lower	high
C3	red	light	lower	lower	low
C4	green	lighter	lower	higher	lower
C5	grey	heavier	lower	high	higher
C6	blue	light	high	low	lower

^a Color of cluster as displayed in Fig. 1

3.2. Analysis of variance

The main effect of treatment was significant for all parameters analyzed from soil samples taken 24 weeks after liming except for $P_{\Sigma F1, F2}$ (Table 5). The main effect of cluster was significant for all regarded parameters.

An interaction between treatment and cluster was significant for all three Ca parameters and the pH value, as well as for P_{F1} and $P_{\Sigma F1, F2}$. But significant interactions were not determined for P_{F2} and none of the K parameters.

Both EUF fractions of Ca and $Ca_{\Sigma F1, F2}$ were significantly different between all three treatments in C1 – C4, whereas for $Ca_{\Sigma F1, F2}$ in C5 treatment Ca03 differed from Ca00 and in C6 from Ca12 (Fig. 2a). For the pH the differentiation between the treatments inside each cluster was less distinct (Fig. 3). Only in C1 all three treatments

Table 5: Analysis of variance (F-Test) for the two EUF nutrient fractions (F1, F2), the sum of both fractions (Σ) and the pH. The F-Test included results from soil analysis of the lime treatments 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ 24 weeks after liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011).

Parameter	Treatment (T)	Cluster (C)	T x C
$Ca_{\Sigma F1, F2}$	***	***	*
Ca_{F1}	***	***	**
Ca_{F2}	***	***	*
$P_{\Sigma F1, F2}$	n.s.	***	***
P_{F1}	*	***	***
P_{F2}	*	*	n.s.
$K_{\Sigma F1, F2}$	**	***	n.s.
K_{F1}	*	***	n.s.
K_{F2}	***	***	n.s.
pH	***	***	*

Notes: *, **, *** equals the level of significance at $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.001$, respectively. n.s. = not significant

differed significantly from each other; in C2 – C5 the pH of Ca00 was significantly lower than in Ca12. In C6 a statistical difference was not stated although an increasing tendency from Ca00 to Ca12 was obvious. Regarding P (Fig. 2b), interactions between treatment and cluster were determined in C1 where $P_{\Sigma F1, F2}$ was higher in Ca12 than in Ca00, and in C5 where P_{F1} of Ca12 was significantly lower than Ca00.

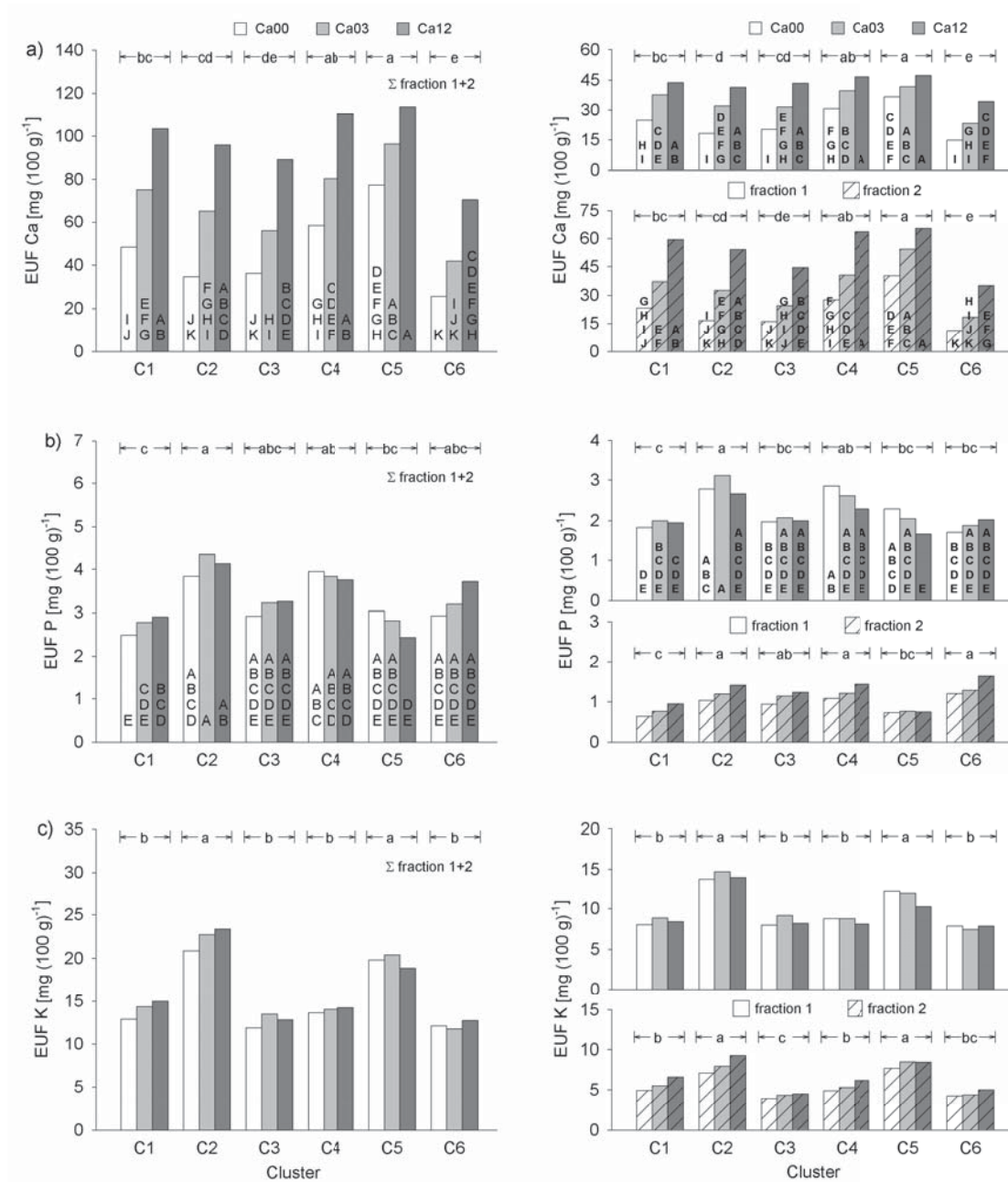


Figure 2: Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on soil contents of (a) calcium (Ca), (b) phosphorous (P) and (c) potassium (K) as determined by electro-ultrafiltration (EUF) in different clusters (C1 – C6) separately for EUF fraction F1 and F2 and the sum of both fractions. Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x cluster.

Differences between clusters across treatments were found for all parameters (Fig. 2 and Fig. 3). The three Ca parameters of C5 and C6 clearly reflected the differences found in PC3 from the PCA; the three K parameters underlined the clustering concerning PC4 (Fig. 1 and Fig. 2c).

By comparing the two groups of clusters G1236 and G45, a clear distinction between the groups was found for the parameters Ca and pH (Fig. 4a and 4b). Within the groups the treatments differed significantly for these parameters, except for the pH value of

Ca03 in G45, which was not different from Ca00. In G1236 the application of lime had an increasing effect on $P_{\Sigma F1, F2}$, whereas in G45 a decreasing, but insignificant trend occurred for $P_{\Sigma F1, F2}$ (Fig. 4c). However, in P_{F1} of G45 Ca12 was significantly lower than Ca00 and Ca03, while P_{F2} of Ca12 was significantly higher than Ca00. Similar results were obtained for K with the exception of K_{F1} in G1236, which was significantly higher in Ca03 than in Ca00 (Fig. 4d).

The grouping of the clusters into G1236 and G45 on the basis of PC3 was reproduced by plotting the two loading variables for PC3, Ca_{F2} and pH, summarized for each cluster (Fig. 5).

Correlations were significant for $\Delta P_{\Sigma F1, F2}$ and ΔP_{F1} , each correlated with PC3, Ca_{F1} and Ca_{F2} , respectively (Table 6). The coefficients were negative, ranging from -0.36 to -0.43. Linear regressions showed an r^2 value of 0.14 for the regression between $\Delta P_{\Sigma F1, F2}$ and PC3, and an r^2 of 0.17 for $\Delta P_{\Sigma F1, F2}$ versus Ca_{F2} (Fig. 6).

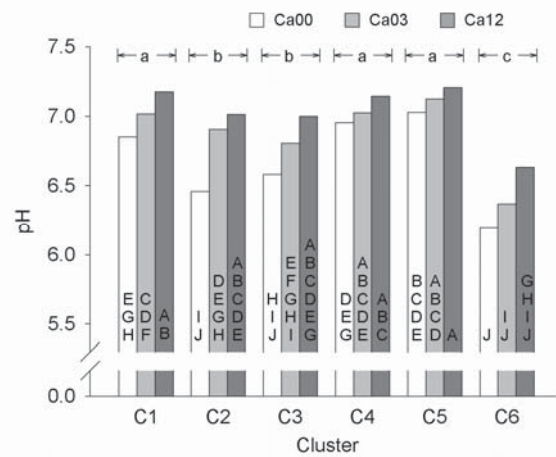


Figure 3: Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on the pH value in the soil in different clusters (C1 – C6). Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x cluster.



4. Discussion

4.1. Classification of trial sites

For the analysis of large datasets, the information can be concentrated by applying a PCA. In order to identify variables that provide a valuable contribution to the explanation of the inherent variance, the MSA criterion was considered (Kaiser, 1970). According to Backhaus et al. (2010) variables with low MSA have to be removed from the analysis. Kaiser and Rice (1974) suggested MSA values of ≥ 0.8 as desirable. However, Reineke et al. (2013) analyzed energy balances in sugar beet production and successfully applied factor analysis with MSA ≥ 0.6 for their dataset. The overall MSA with 0.76 in our study can be regarded between middling and meritorious as defined by Kaiser and Rice (1974). With 98% the four extracted PCs explained a high amount of the total variance (Table 1). Other researchers applied PCA to data from soil analysis and gained portions of 79% (Laudicina et al., 2009), 83% (Shukla et al., 2004) and 94% (Sena et al., 2002) of the inherent variance with their extracted PCs.

The concept of a PCA with a reduction of dimensions involves the risk that the initial information decreases due to the transformation from many variables to few PCs. Other researchers accepted for a single input variable a final communality estimate of 44%

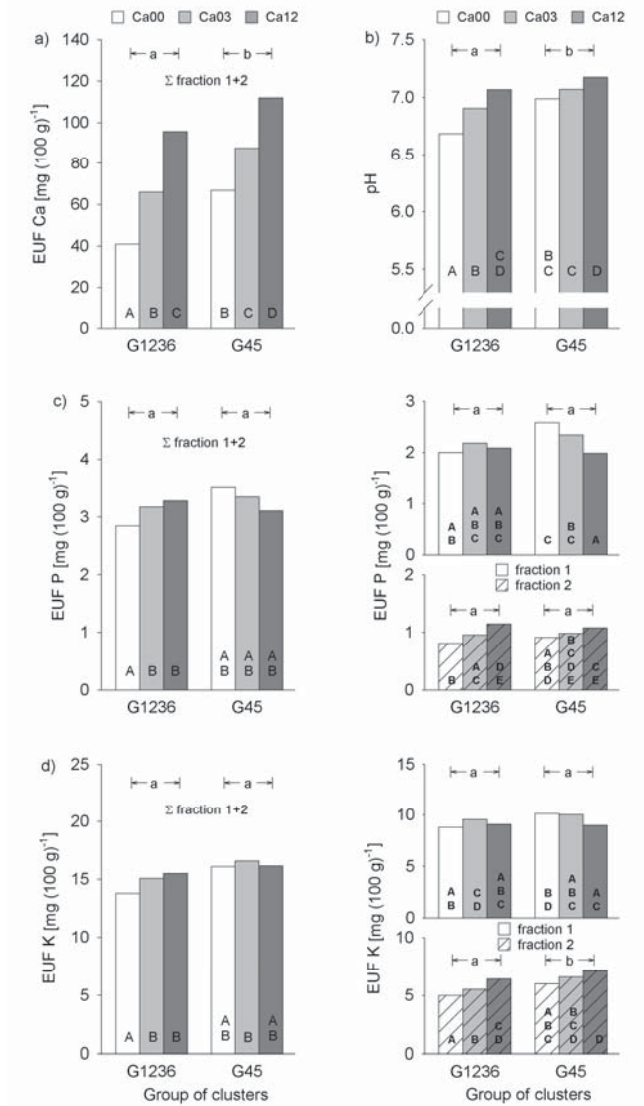


Figure 4: Effect of lime in doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ (Ca00, Ca03, Ca12) on the (a) calcium (Ca) content, (b) pH, (c) phosphorous (P) content and (d) potassium (K) content as determined by electro-ultrafiltration (EUF) in the soil of the groups G1236 and G45. Results originate from 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Means with different letters are significantly different at $p \leq 0.05$. Lower case letters refer to differences between cluster means, upper case letters to differences between means of treatment x group.

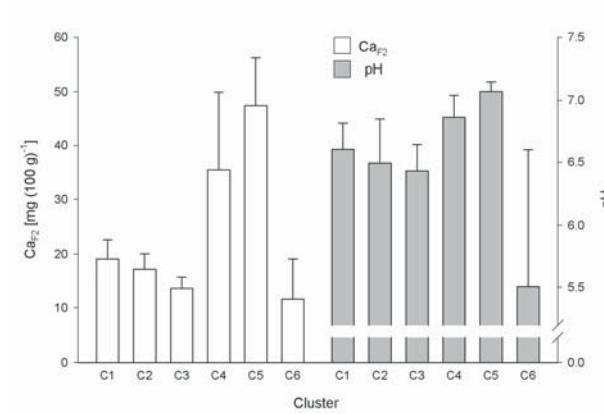


Figure 5: Calcium (Ca) content of the second EUF fraction (F₂) and pH in the soil of six clusters (C1 – C6) before liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). Bars show the cluster mean, whiskers the standard deviation. Number of environments contributing to each cluster: C1=23; C2=8; C3=7; C4=9; C5=7 and C6=4.

For most variables the distribution of factor loadings was emphasized to one of the four extracted PCs. Only 2 of the 17 variables (*EUF N org*, *Base saturation Ca*) expressed factor loadings < -0.4 or $> +0.4$ for more than one PC. However, while factor loadings were used as one of the measures for the exclusion of variables from the PCA, only factor loadings < -0.6 and $> +0.6$ were considered for the interpretation of the PCs. *Reineke et al.* (2013) used factor loadings < -0.4 and $> +0.4$ for the interpretation of their six extracted PCs. *Laudicina et al.* (2009) used factor loadings < -0.5 and $> +0.5$ for the interpretation of three PCs in their assessment of reclamation soils.

Even though the interpretation of the four PCs as *soil texture*, *organic potential*, *buffer capacity* and *potassium capability* on the basis of the factor loadings was very obvious, the variation of each PC over the sites has to be pointed out in detail. As the environments used in the present study were initially selected by *Fischer et al.* (2015a) as a measure of replication, the soil parameters before trial establishment did not vary largely. Furthermore, the most relevant parameters, such as Ca content and soil

(*Reineke et al.*, 2013) and 41% (*Hoffmann et al.*, 2009). However, it might be appropriate to use a variable with as little as 36% of the variance explained (*Shukla et al.*, 2004), nevertheless, higher communality estimates should be preferred over lower estimates. In our study the greatest loss of information was accepted for the variable *Ca-carbonate* and P_{F2} with 43% and 48% of variance explained by the extracted PCs, respectively, those variables also expressed low factor

Table 6: Pearson's coefficient of correlation for the difference (Δ) of EUF nutrient contents between lime and control treatments of the fractions (F₁, F₂) and the sum of both fractions (Σ) of phosphorus (P) and potassium (K) versus buffer capacity (PC₃) and EUF calcium fractions (Ca_{F1} , Ca_{F2}). Data base were results from soil analysis 24 weeks after liming 58 environments in Germany and Austria (2010 and 2011). (underlined coefficients are significant at $p \leq 0.01$).

	PC ₃	Ca_{F1}	Ca_{F2}
$\Delta P_{\Sigma F1, F2}$	<u>-0.38</u>	<u>-0.43</u>	<u>-0.41</u>
ΔP_{F1}	<u>-0.36</u>	<u>-0.41</u>	<u>-0.39</u>
ΔP_{F2}	-0.16	-0.18	-0.18
$\Delta K_{\Sigma F1, F2}$	-0.09	-0.12	-0.13
ΔK_{F1}	-0.11	-0.20	-0.19
ΔK_{F2}	0.02	0.09	0.06



texture, were even selected to be as similar as possible. Therefore, the ranges of the interpreted PCs have to be regarded under consideration of the limited variation between the environments, but simultaneously demonstrating the sensitivity of the analysis procedure.

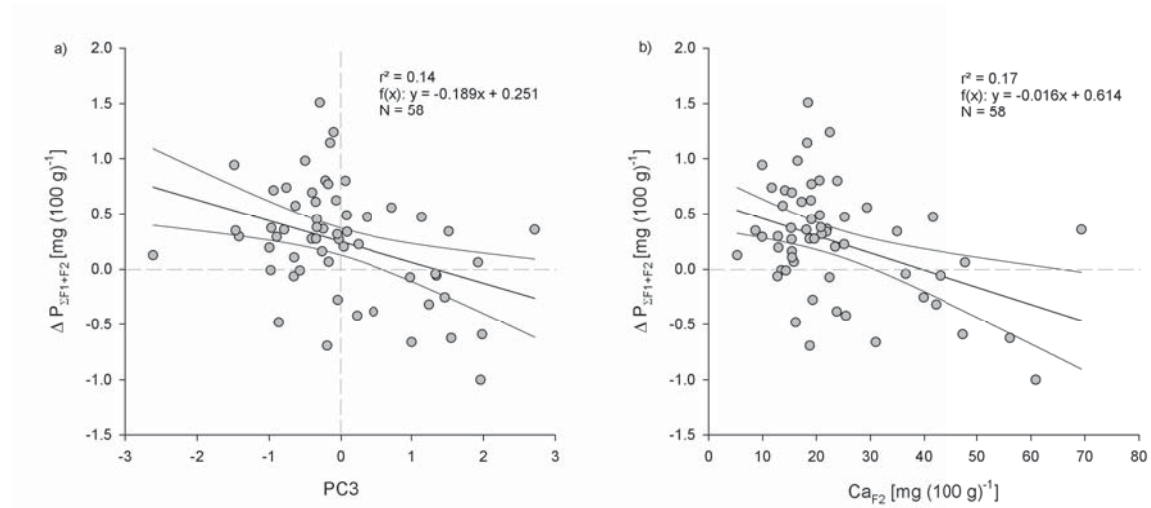


Figure 6: Linear regression and confidence interval (95%) for the difference between lime and control treatments of EUF extractable phosphorus ($\Delta P_{SF1,F2}$) 24 weeks after liming versus (a) the buffer capacity (PC3) and (b) EUF calcium in the second fraction (Ca_{F2}) from soil samples taken before trial establishment. Data base were results from soil analysis of liming trials in 58 environments with doses of 0, 3 and 12 t CaO ha⁻¹ in Germany and Austria (2010 and 2011).

The similarity of the environments was reflected by the results of the subsequently applied hierarchical CA on the basis of the factor scores calculated for each PC in each environment. The statistical challenge is to identify the correct number of clusters among the environments. *Milligan and Cooper* (1985) examined different procedures for the determination of the perfect number of clusters in a data set. The techniques – sometimes referred to as stopping rules – that were applied in the present study ranged among the best performing techniques in the examination of *Milligan and Cooper* (1985). Both the PSF and the PST2 provided the best matches of all the regarded stopping rules. In our study, the peak with the CCC at 0.51 for six clusters (Table 2) ranged below the preferred value between two and three for good clustering as defined by *Sarle* (1983) and rather indicated the existence of possible clusters. The PSF described a plateau with similar values for the 5- and 6-cluster solution, and the low points of the PST2 indicated towards the 6- or 8-cluster solution. Finally, all three techniques applied for the determination of the inherent number of clusters indicated towards the 6-cluster solution. However, the results of the stopping rule were not strongly expressed, and therefore, reflected the similarity of the environments.

The six plots as depicted in Fig. 1 describe the six possible combinations of the four PCs and thereby, the distinction of the clusters. Each cluster differed at least in one out of the four dimensions, i.e. PCs, from the other clusters. However, it is important to consider that the interpreted PCs in Fig. 1 described the variation which was measured in the environments incorporated in the present study. For example, the range of our PC1, interpreted as *soil texture*, may not be confused with the range of measurable soil texture as determined by *DIN ISO 11277* (1998).

4.2. Effects of liming on soil calcium, pH, potassium and phosphorus

The level of Ca measured in each cluster (Fig. 2) confirmed the *ex ante* classification as described by PC3, which was interpreted as *buffer capacity* (Table 4 and Fig. 1). The *buffer capacity* gave the clearest discrimination between clusters except for C6, which differed distinctly from the other clusters with regard to PC2. The main variables, loading to PC3 were the two EUF Ca fractions and the pH. Consequently, grouping into G1236 and G45 highlighted the differences between the groups for the parameters Ca and pH, whereby Ca gave a clearer differentiation between clusters pooled in G1236 and G45 compared to the pH. Moreover, in G45 with the high initial *buffer capacity*, liming caused just a slight increase in the pH value, while the increase was more pronounced in G1236. *Wasner et al.* (2001) conducted field trials with high doses of lime on calcareous soils and observed a noteworthy increase of the pH due to the application of lime only at the site with the lowest initial pH value. In addition, they found the least increase in Ca at the site with the highest initial CaCO₃ content. To conclude, grouping of clusters into G1236 and G45 on the basis of PC3 was justified and moreover, promising due to the importance of Ca and pH for their influence on extractability of other nutrients (*Horn et al.*, 2009; *VDLUF*A, 2002a). The pH value was less suitable for the differentiation between groups of clusters and between treatments within cluster groups than the Ca content (Fig. 5). However, the thresholds for an intervention to adapt the fertilizer recommendation on the basis of pH and Ca_{F2} (*Horn et al.*, 2009; *VDLUF*A, 2002a) were not crossed in any cluster.

Regarding the plant available K content, the expected interaction between treatment and cluster was not detected (Fig. 1). Therefore, an interactive effect of a lime treatment and availability of K as described by *Ehrenberg* (1920) could be ruled out for the environments included in the present study. In accordance with *Ehrenberg* (1920), *Várnai et al.* (1985) found a reduced extraction of K_{F1} after the application of lime to an acid soil in pot trials. They described a fixation of K by free exchange sites of clay minerals after the



Artikel 2: Predict the effect of liming

precipitation of aluminum (Al) hydroxy cations and Al^{3+} ions due to the pH increase after liming. The environments included in the present study did not show such a K fixation in any cluster. Our examination of the grouped clusters confirmed the mechanism suggested by *Fischer et al. (2015a)*: the application of lime to soils with low initial Ca contents in G1236 increased the extractability of K, indicating the penetration of large hydrated Ca ions into interlayer spaces of clay minerals (*Jackson and During, 1979; Sawhney, 1972*). In contrast, the high initial Ca contents of G45 resulted in a deregulation of voltage during EUF extraction procedure (*Appel and Horn, 2010; Pauler and Neumann, 1999*) as discussed by *Fischer et al. (2015a)*, thereby causing a shift of extracted K towards K_{F_2} in Ca_{12} .

Grouping of clusters revealed a significant, increasing effect of lime treatment on $\text{P}_{\Sigma\text{F}_1, \text{F}_2}$ for the environments with lower *buffer capacity* (G1236). Consistently, *Scheffer and Scheffer (1984)* reported an increasing effect of a high lime treatment on extractable P of nearly neutral soils. They carried out laboratory and pot trials with amounts of 19 t CaO ha^{-1} causing an increased desorption of P. In our study, the pH effect substantially contributed to the explanation of different effects of liming on $\text{P}_{\Sigma\text{F}_1, \text{F}_2}$ depending on the cluster group. While in G1236 the pH clearly differed between all three treatments, it increased much less pronounced with increasing the amount of lime in G45. In laboratory and greenhouse experiments *Lemme (2014)* proved that liming increased extractable P of nearly neutral, but Ca deficient loess soils and concluded, that this effect was due to an increase of the pH value, thereby confirming our results. However, in G45 we observed a decreasing effect of a high lime treatment on P_{F_1} , which obviously originated from the high *buffer capacity* of the environments pooled in this group. This is supported by the examination of *Helyar et al. (1976)* on the adsorption of P by the soil mineral gibbsite ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$). They suggested that Ca increased the adsorption of P by hydrous oxides and that this effect dominated over a possible desorption of P due to an increase of pH, thereby decreasing the amount of EUF extractable P.

To conclude, the increased extractability of P in G1236 support the recommendation of *Scheffer and Scheffer (1984)* to raise the soil pH above 7. However, on soils with a relatively high initial pH value (G45), the extractability of P rather decreased after the application of lime. Thus, a general recommendation to raise the soil pH above 7 in order to increase the availability of P has to be regarded with caution. In his experiments on the P fractionation of soils *Lemme (2014)* reported of a decrease of the H_2O extractable P fraction

after a high lime treatment but an increase of the NaHCO_3 extractable P fraction, which he found to be available to sugar beet plants.

The coefficients for the correlations between $\Delta P_{\Sigma F1, F2}$ and PC_3 , Ca_{F1} and Ca_{F2} , respectively, were significant, but not high. However, they indicate that $P_{\Sigma F1, F2}$ was negatively affected by these parameters in environments with a high *buffer capacity*. The selection criterion for the environments was a low Ca content. Thus, it can be assumed, that liming soils with a high *buffer capacity* and thereby increasing their Ca_{F2} is likely to result in a decreased extraction of $P_{\Sigma F1, F2}$. The precipitation of Ca-phosphates was reported by *Schachtschabel* and *Heinemann* (1964) when Ca was applied to soils with pH_{KCl} values above 6.0.

At present, the calculation of the EUF fertilizer recommendation for P is being adapted for soils with a high Ca_{F2} content. With each mg of Ca_{F2} above the threshold value of $65 \text{ mg Ca}_{F2} (100 \text{ g})^{-1}$, P_{F1} is calculative increased by 4% and P_{F2} by 2%, respectively (*Horn et al.*, 2009). High values of Ca_{F2} lead to a limited extraction of EUF P, similar to the extraction using CAL and the correction formula on the basis of the pH value (*VDLUFA*, 2002a).

Our results confirm the threshold of $40 \text{ mg Ca}_{F2} (100 \text{ g})^{-1}$, below which liming is required (*Németh et al.*, 1989) and above which liming would result in a negative effect on extractable P (Fig. 6). On the other hand, our results could improve fertilizer recommendations by considering the increasing effect of liming in environments with a low *buffer capacity*, and thus, a low Ca_{F2} . For instance, the application of the linear regression (Fig. 6b) indicates, that $P_{\Sigma F1, F2}$ could be increased by 0.5 mg P, if a soil with initially $10 \text{ mg Ca}_{F2} (100 \text{ g})^{-1}$ receives liming. The fertilizer recommendation for P would be decreased by 10 to 15 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (*Horn*, 2011).

However, the coefficient of determination (r^2) of 0.17 is rather low and further investigations including plant growth and nutrient uptake are required to point out the relevance of our findings. Therefore, the present study has to be regarded as the second step after the initial trials of *Fischer et al.* (2015a). In a third step, the examination has to be accomplished by experiments considering nutrient uptake and crop yield.



5. Conclusions

In our study we applied multivariate statistical methods on data from soil analysis at 62 field trials. The aim was to cluster environments for *ex ante* identification of environments responding differently to lime application regarding plant available P and K as measured by the EUF extraction method.

The feasibility of the statistical procedures for the differentiation of environments was proven, despite the pronounced similarity among the environments. However, the magnitude of the measured effects in the clusters was low. Only after grouping the clusters, relevant effects of liming on the EUF extractable P and K were measured. Environments with a low *buffer capacity* (G1236) revealed an increasing effect of a lime treatment on the EUF extractable P and K content in the range of 10% - 15%, whereas environments with a high *buffer capacity* (G45) tended to exhibit a decreasing effect of a high lime treatment on P_{F1} .

At this stage, the improvement of the EUF fertilizer recommendation on the basis of our results appears promising. For example, the recommended amount of P fertilizer may be reduced for soils with a low *buffer capacity*, i.e. Ca_{F2} contents below $40 \text{ mg } Ca_{F2} (100 \text{ g})^{-1}$. However, before these finding can be implemented into practice two prerequisites have to be met: 1. The applicability of the statistical procedures has to be consolidated by including more environments with initial Ca_{F2} contents between 25 and $45 \text{ mg } Ca (100 \text{ g})^{-1}$. 2. The relevance of the detected effects of liming on soil P and K has to be confirmed in plant experiments.

Acknowledgements

The study was financed by K+S KALI GmbH (Kassel, Germany), Südzucker AG (Mannheim, Germany) and BGD-Bodengesundheitsdienst GmbH (Ochsenfurt, Germany). The authors would like to thank the colleagues from the Institute of Sugar Beet Research (Göttingen, Germany) and the Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau (Mannheim, Germany) for scientific and technical support.



References

- Appel, T., Horn, C. (2010): Bodenfingerprints bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF) zur Optimierung der Düngeempfehlung. Abschlussbericht, Fachhochschule Bingen, Germany.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (2010): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin, Germany.
- Baraldi, G., Bertuzzi, S., Bovolenta, S., Campagna, G. (2006): First results of carbonation lime application in alkaline soils. 69. IIRB Congress, Brüssel, pp. 319–328.
- Barrow, N. J. (1984): Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. *J. Soil Sci.* 35, 283–297.
- Beckett, P. H. T., Nafady, M. H. M. (1967): Potassium-calcium exchange equilibria in soils: The location of non-specific (Gapon) and specific exchange sites. *J. Soil Sci.* 18, 263–281.
- Calinski, T., Harabasz, J. (1974): A dendrite method for cluster analysis. *Commun. Stat.* 3, 1–27.
- DIN ISO 10693 (1997): Soil quality: Determination of carbonate content - Volumetric method. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 10694 (1996): Soil quality: Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). Beuth, Berlin.
- DIN ISO 11260 (1994): Soil quality: Determination of cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 11277 (1998): Soil quality: Determination of particle size distribution in mineral soil material: Method by sieving and sedimentation. Beuth, Berlin.
- Ehrenberg, P. (1920): Das Kalk-Kali-Gesetz. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin, Germany.



Artikel 2: Predict the effect of liming

- Fischer, S., Koch, H.-J., Bürcky, K. (2015a): Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Arch. Agron. Soil Sci.* 61, 725-736. DOI: 10.1080/03650340.2014.953070.
- Food and Agriculture Organization (2014): World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome.
- Grass, K., Budig, M. (1976): Kalkwirkung in Ackerlandversuchen. *Landwirtsch. Forsch. Sonderh.* 33/I, 95–105.
- Haynes, R. J. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil* 68, 289–308.
- Haynes, R. J. (1984): Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. Agron.* 37, 249–315.
- Haynes, R. J., Naidu, R. (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 51, 123–137.
- Helyar, K. R., Munns, D. N., Burau, R. G. (1976): Adsorption of phosphate by gibbsite. I. Effects of neutral chloride salts of calcium, magnesium, sodium and potassium. *J. Soil Sci.* 27, 307–314.
- Hoffmann, C. M., Huijbregts, T., van Swaaij, N., Jansen, R. (2009): Impact of different environments in Europe on yield and quality of sugar beet genotypes. *Eur. J. Agron.* 30, 17–26.
- Horn, C., Appel, T., Steffens, D. (2009): Neue Gerätetechnik bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF) hilft bei der Prognose der Phosphatverfügbarkeit auf kalkhaltigen Böden. *VdLUFA Kongress, Karlsruhe*, pp. 474–482.
- Horn, D. (2011): Personal communication.
- Jackson, B. L. J., Doring, C. (1979): Studies of slowly available potassium in soils of New Zealand I. Effects of leaching, temperature and potassium depletion on the equilibrium concentration of potassium in solution. *Plant Soil* 51, 197–204.



Artikel 2: Predict the effect of liming

- Jaskulska, I., Jaskulski, D., Kobierski, M. (2014): Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment. *Plant Soil Environ.* 60, 146–150.
- Kaiser, H. F. (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200.
- Kaiser, H. F. (1959): Computer program for varimax rotation in factor analysis. *Educ. Psychol. Meas.* 19, 413–420.
- Kaiser, H. F. (1960): The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educ. Psychol. Meas.* 20, 141–151.
- Kaiser, H. F. (1970): A second generation little jiffy. *Psychometrika* 35, 401–415.
- Kaiser, H. F., Rice, J. (1974): Little Jiffy, Mark IV. *Educ. Psychol. Meas.* 34, 111–117.
- Kreutzer, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. *Plant Soil* 168-169, 447–470.
- Laudicina, V. A., Hurtado, M. D., Badalucco, L., Delgado, A., Palazzolo, E., Panno, M. (2009): Soil chemical and biochemical properties of a salt-marsh alluvial Spanish area after long term reclamation. *Biol. Fertil. Soils* 45, 691–700.
- Lemme, H. (2014): Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares und pflanzenverfügbares Phosphat sowie Phosphatfraktionen des Bodens. PhD-Thesis, University Göttingen, Germany.
- Mengel, K., Kirkby, E. A. (2001): *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Milligan, G. W., Cooper, M. C. (1985): An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika* 50, 159–179.
- Németh, K. (1985): Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant Soil* 83, 1–19.
- Németh, K., Bartels, H., Heuer, C., Ziegler, K. (1989): Kalkbedarf mittels EUF sicher und genau beurteilen. *Zuckerindustrie* 114, 336–338.



Artikel 2: Predict the effect of liming

- Orlovius, K. (1988): Optimale K-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von Standortfaktoren, dargestellt an Hand langjähriger Feldversuche. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 609-629.
- Pauler, B., Neumann, K.-H. (1999): Methodische Untersuchungen zum Extraktionsverhalten der Elektro-Ultrafiltration unter kontinuierlicher Registrierung der elektrischen Betriebsfaktoren. Available from: <<http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/1999/128/>> [10 February 2012].
- Reineke, H., Stockfish, N., Märländer, B. (2013): Analysing the energy balances of sugar beet cultivation in commercial farms in Germany. *Eur. J. Agron.* 45, 27–38.
- Rex, M., Munk, H. (1988): Die Eichung der EUF-Methode an ein- und mehrjährigen Feldversuchen hinsichtlich der Phosphatdüngung. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 600-608.
- Sarle, W. S. (1983): SAS Technical Report A-108, Cubic Cluster Criterion. SAS Tech. Rep. -108 Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SAS Institute Inc. (2011): SAS/STAT® 9.3 User's Guide Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sawhney, B. L. (1972): Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays Clay Miner.* 20, 93–100.
- Schachtschabel, P., Heinemann, G. (1964): Beziehungen zwischen P-Bindungsart und pH-Wert bei Lößböden. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkd.* 105, 1–13.
- Scheffer, B., Scheffer, K. (1984): Der Einfluß von Kalk und Kieselsäure auf die Phosphatmobilität (CAL) in Böden. *Landwirtsch. Forsch.* 37, 1–8.
- Scheffer, K., Schreiber, A., Kickuth, R. (1980): Die sorptive Bindung von Düngephosphaten im Boden und die phosphatmobilisierende Wirkung der Kieselsäure - Übersichtsbeitrag - 1. Mitteilung: Die sorptive Bindung von Phosphat im Boden. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.* 24, 799–814.
- Sena, M. M., Frighetto, R. T. S., Valarini, P. J., Tokeshi, H., Poppi, R. J. (2002): Discrimination of management effects on soil parameters by using principle component analysis: a multivariate analysis case study. *Soil Tillage Res.* 67, 171–181.



Artikel 2: Predict the effect of liming

- Shukla, M. ., Lal, R., Ebinger, M. (2004): Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern ohio. *Soil Sci.* 169, 133–142.
- Várnai, M., Eifert, J., Szöke, L. (1985): Effect of liming on EUF-nutrient fractions in the soil, on nutrient contents of grape leaves and on grape yield. *Plant Soil* 83, 55–63.
- VDLUFA (1991): *Bodenuntersuchungsmethode A 5.1.1. Bestimmung des pH-Wertes.* VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Germany.
- VDLUFA (1997): *Standpunkt Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung.* Hrsg: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt, Germany.
- VDLUFA (2002a): *Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat–Lactat–Auszug, A 6.2.1.1;* in *VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.* VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Germany.
- VDLUFA (2002b): *Bestimmung der durch Elektro-Ultrafiltration löslichen Anteile von Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Natrium, Schwefel und Bor, A 6.4.2;* in *VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.* VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Germany.
- Ward, J. H. jr. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Am. Stat. Assoc. J.* 58, 236–244.
- Wasner, J., Liebhard, P., Eigner, H. (2001): Ausbringung von Carbokalk auf Ackerböden mit hohem pH-Wert im pannonischen Anbaugebiet Österreichs. *Zuckerindustrie* 126, 194–201.
- Wong, M. A., Lane, T. (1983): A kth nearest neighbour clustering procedure. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* 45, 362–368.
- Zhang, X. C., Norton, L. D. (2002): Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *J. Hydrol.* 260, 194–205.

IV. Artikel 3

Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares Phosphor und Kalium im Boden sowie auf Nährstoffentzug, Ertrag und Qualität von Zuckerrüben bei differenzierter Kaliumdüngung in Feldversuchen

Sven Fischer, Klaus Bürcky, Heinz-Josef Koch, Bernward Märländer

Kurzfassung

Die Kalkdüngung bedürftiger Böden ist gute fachliche Praxis. Durch die Anhebung des pH-Wertes und die Zufuhr von Calcium (Ca) können sich Extrahierbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor (P) und Kalium (K) verändern. Das muss bei der Erstellung einer Düngeempfehlung für Zuckerrüben auf Basis einer Bodenuntersuchung mittels Elektro-Ultrafiltration (EUF) eventuell berücksichtigt werden. Mit der vorliegenden Studie wurde geprüft, wie sich die Kalkdüngung von neutralen bis schwach sauren Böden mit gleichzeitig niedrigem EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion auswirkt auf (i) die EUF extrahierbaren Nährstoffe P und K im Boden, (ii) den P- und K-Entzug, sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben insbesondere bei einer zusätzlich ausgebrachten K-Düngung. Zunächst wurde Branntkalk im Sommer vor dem Anbau von Zuckerrüben in Mengen von 0, 3 und 12 t CaO ha⁻¹ gedüngt und der Boden nach 24 Wochen mittels EUF analysiert. Anschließend wurden Zuckerrüben mit verschiedenen Düngevarianten (N, K, Mg) auf den mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ gedüngten Teilstücken angebaut. Die Kalkung mit 3 t CaO ha⁻¹ bewirkte im Boden keine Änderung der EUF extrahierbaren Nährstoffgehalte. Nach einer Kalkdüngung wurden geringfügig niedrigere P- und K-Gehalte in der Rübe gemessen, der Frischmasseertrag stieg um 1,4 t ha⁻¹, der Bereinigte Zuckerertrag (BZE) um 0,3 t ha⁻¹. Eine zusätzlich ausgebrachte K-Düngung bewirkte den erwarteten Anstieg des Zuckergehaltes. Außerdem erhöhte die K-Düngung innerhalb der gekalkten Varianten auch den BZE gegenüber der Variante ohne K, allerdings nicht über das Niveau der ungekalkten Varianten. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Kalkdüngung in praxisüblicher Menge eine Veränderung der Düngeempfehlung für P und K nicht erforderlich ist.

Stichwörter: Elektro-Ultrafiltration, Bodenuntersuchung, Düngung, Branntkalk, Calcium, Nährstoffwechselwirkungen



Einleitung

Die Kalkdüngung ist ein wesentlicher Baustein zur Erhaltung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit von landwirtschaftlich genutzten Böden. Ziel der Kalkung ist es, einerseits den pH-Wert des Bodens anzuheben und andererseits mit dem Sickerwasser ausgewaschenes Calcium (Ca) zu ersetzen. Auswaschung tritt auf, weil versauernde Prozesse im Boden und sauer wirkende Einträge gebundenes und adsorbiertes Ca zuvor in Lösung gebracht haben (Scheffer und Schachtschabel, 1992). Die Zufuhr von Düngemitteln auf landwirtschaftlich genutzte Böden beeinflusst nicht nur die gedüngten, sondern auch die bereits im Boden vorhandenen Nährstoffionen. Moore und Quimet (2010) berichten von einem durch Magnesium (Mg)-haltigen Kalkdünger induzierten Kalium (K)-Mg-Antagonismus in einem Kalkversuch mit Zuckerahorn, während Mg-arme Kalkdünger keinen Antagonismus auslösten. Für Ackerkulturen fehlen jedoch spezifische Studien. Insbesondere Kalkdünger können Ionen-Antagonismen fördern, da sie im Boden sowohl den pH-Wert anheben als auch große Mengen Ca zuführen. So hat der pH-Wert einen erheblichen Einfluss auf die Extrahierbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor (P). Der niedrige Ausgangs-pH eines sauren Bodens wird durch die Kalkung angehoben. Hierdurch steigt die Desorption von P, das an Eisen- (Fe) und Aluminium- (Al) adsorbiert ist. Folglich ist davon auszugehen, dass die Extrahierbarkeit von P aus dem Boden erhöht wird und der P-Entzug durch Pflanzen gesteigert werden könnte. Erst bei starkem pH-Anstieg und genügend verfügbarem Ca im Boden wird P als Ca-Phosphat gebunden und die Extrahierbarkeit aus dem Boden sowie der P-Entzug von Pflanzen gesenkt (Haynes, 1982). Untersuchungen zur P-Verfügbarkeit nach einer Kalkung von schwach sauren und neutralen Böden fehlen bislang.

Neben dem pH-Wert hat auch der Ca-Gehalt des Bodens Einfluss auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen. In Böden mit niedrigem Ca-Gehalt steigt die Ca-Basensättigung infolge der Zufuhr von Ca^{2+} -Ionen (Mengel und Kirkby, 2001). Hierdurch ist eine erhöhte Extrahierbarkeit von K zu erwarten, da an den Austauschern gebundenes K durch Ca verdrängt werden kann (Beckett und Nafady, 1967). Dagegen kann die Aufnahme von K durch Pflanzen nach einer Kalkdüngung vermindert sein. Ehrenberg (1920) beschreibt in seinem Kalk-Kali-Gesetz niedrige K-Entzüge von Roggen nach einer Kalkung. Diesem Effekt liegt ebenfalls ein Ionen-Antagonismus in Boden und Pflanze zugrunde (Mengel, 1984). Eine zusätzlich ausgebrachte K-Düngung kann diesem Antagonismus



entgegenwirken (Ehrenberg, 1920). Eine Quantifizierung dieses Zusammenhangs für mitteleuropäische Böden mit Zuckerrübenanbau wurde jedoch bislang nicht vorgenommen.

Eine wichtige Voraussetzung für eine fundierte Düngeberatung ist die Kenntnis über die zuvor genannten Zusammenhänge und Vorgänge im Boden. Wechselwirkungen müssen mittels Bodenuntersuchung qualitativ und quantitativ erfasst werden. In der Düngeberatung, die auf der Elektro-Ultrafiltration (EUF) als Bodenuntersuchungsmethode für die Nährstoffe Stickstoff (N), P, K, Ca, Mg, etc. aufbaut (Németh, 1976), werden derzeit bereits Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Nährstoffen berücksichtigt (Németh, 1979). So wird beispielsweise der EUF-P-Gehalt in Böden mit geogen bedingt hohen Carbonat-Gehalten und damit verminderter P-Extraktion für die Berechnung der Düngeempfehlung korrigiert. Bislang ungeklärt ist aber, ob im Falle einer Kalkzufuhr auf schwach sauer bis neutral reagierenden Böden ebenfalls eine verminderte P-Extraktion auftritt, die in der Düngeempfehlung berücksichtigt werden muss. Deshalb soll mit der vorliegenden Studie geprüft werden, wie sich die Kalkdüngung von neutralen bis schwach sauren Böden mit gleichzeitig niedrigem EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion auswirkt auf (i) die EUF extrahierbaren Nährstoffe P und K im Boden, (ii) den P- und K-Entzug, sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben insbesondere bei einer zusätzlich ausgebrachten K-Düngung. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die Genauigkeit der EUF-Düngeempfehlung für P und K zu erhöhen. Die hierfür durchgeführten Feldversuche mit Zuckerrüben wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes bearbeitet, in dem sich Lemme et al. (2014) der Fragestellung unter Labor- und Gewächshausbedingungen zuwandten.

Material und Methoden

Feldversuche

In den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 wurden je 5 Feldversuche im Süden und der Mitte Deutschlands durchgeführt (Abb. 1). An allen Standorten lagen Parabraunerden aus Löss vor. Die Standorte

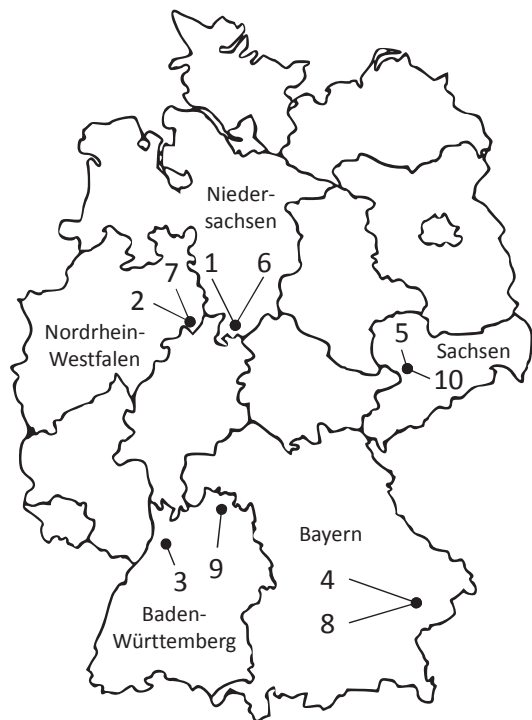


Abb. 1: Lage der Versuchsstandorte in Deutschland



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

Dransfeld Nord (Standort 1), Kirchdorf Nord (8) und Süd (4) sowie Roda Nord (5) und Süd (10) wiesen eine Pseudovergleyung auf, Menne (7) war kolluvial überlagert und Vilchband (9) erodiert, so dass ein so genannter Weißlehm anstand. Zur Charakterisierung der Standorte wurden Textur, Humusgehalt und C/N-Verhältnis bestimmt (Tab. 1). Die Standortwahl erfolgte aufgrund von Bodenuntersuchungen (Tab. 2), die vor Versuchsbeginn durchgeführt wurden. Wesentliches Auswahlkriterium war ein EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion von weniger als $40 \text{ mg (100 g Boden)}^{-1}$, da unterhalb dieses Wertes keine optimale Kalkversorgung im Boden vorliegt (Németh et al., 1989).

Die Versuchsdurchführung erfolgte in einer 2-faktoriellen Spaltanlage in zwei Phasen. In der ersten Phase wurde auf die Großteilstücke Branntkalk ausgebracht und die Veränderung der Nährstoffgehalte im Boden untersucht. In der zweiten Phase fand der Anbau von Zuckerrüben mit 12 verschiedenen Düngevarianten auf den Kleinteilstücken statt.

Tabelle 1: Boden- und Klimaeigenschaften der Versuchsstandorte

Jahr	2011					2012				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Standort										
Ort	Dransfeld Nord	Großen-eder	Ober-gimpem	Kirchdorf Süd	Roda Nord	Dransfeld West	Menne	Kirchdorf Nord	Vilchband	Roda Süd
Parameter										
Tongehalt [%]	15	16	20	20	15	15	15	20	21	12
Schluffgehalt [%]	76	80	75	75	79	80	80	76	75	80
Bodenart	Ut3	Ut3	Ut4	Ut4	Ut3	Ut3	Ut3	Ut4	Ut4	Ut2
Ackerzahl	70	83	68	75	68	78	90	85	68	65
Jahresdurchschnitts-temperatur [°C]	8,7	8,1	9,5	8,1	8,9	8,7	8,1	8,1	8,3	8,9
Jahresniederschlags-summe [mm]	720	720	800	780	650	720	720	780	660	650
Humusgehalt [%]	2,1	2,2	2,0	2,1	2,2	1,9	2,1	1,8	1,6	2,2
C/N-Verhältnis	10,2	10,1	9,0	9,1	13,0	9,30	10,0	8,8	8,8	10,1

Versuchsdurchführung Phase 1

Um den Einfluss der Kalkung auf die EUF extrahierbaren Nährstoffe im Boden zu untersuchen, wurden drei Kalkvarianten in vierfacher Wiederholung je Standort angelegt. Neben einer nicht gekalkten Kontrolle (CaO-0), wurde gemahlener Branntkalk (90 % CaO) in Höhe von 3 t CaO ha^{-1} (CaO-3) und 12 t CaO ha^{-1} (CaO-12) gedüngt. Dabei wurden die



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

Varianten CaO-0 und CaO-3 als Großteilstücke einer Spaltanlage mit Blöcken hintereinander zu jeweils 500 – 650 m² angelegt. Variante CaO-12 wurde an den Seiten der Blöcke in 100 m² großen Parzellen angefügt. Diese Variante wurde ausschließlich in Versuchsphase 1 betrachtet, da der Anbau von Zuckerrüben nach einer Kalkung in Höhe von 12 t CaO ha⁻¹ für die Praxis als nicht relevant erachtet wurde. Die Ausbringung des Branntkalks erfolgte nach Ernte der Getreidevorfrucht im Sommer vor dem Anbau von Zuckerrüben. Nachfolgende Bodenbearbeitung wurde betriebsspezifisch mit Grubber und gegebenenfalls anschließend wendender Bodenbearbeitung durchgeführt. Eine organische Düngung und der Anbau von Zwischenfrüchten erfolgten nicht.

In Vorbereitung der zweiten Phase wurden im Herbst vor dem Anbau von Zuckerrüben die ersten 7 der 12 Düngevarianten als Kleinteilstücke der Spaltanlage angelegt. Hierfür wurden verschiedene Mengen K (0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹) und Mg (0, 30, 60 kg MgO ha⁻¹) als Korn-Kali[®], 60er Kali[®] und ESTA[®]Kieserit gedüngt. Die übrigen Düngevarianten folgten im Frühjahr als gestaffelte N-Düngung.

Tabelle 2: Calcium (Ca_{EUF})-, Kalium (K_{EUF})- und Phosphor (P_{EUF})-Gehalt in beiden EUF-Fractionen (F1, F2) und pH_{CaCl_2} -Wert der Standorte vor der Kalkung, sowie Einfluss der Kalkung mit 0, 3 und 12 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0, CaO-3 und CaO-12) im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands zum Zeitpunkt 24 Wochen nach der Ausbringung. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)

Parameter	Standort										Mittelwert					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	CaO-0	CaO-3	CaO-12			
	----- vor Versuchsbeginn -----										-- 24 Wochen nach Kalkung --					
$Ca_{EUF-F1}^{\#}$	23	26	24	25	20	18	29	28	18	19	23	a	34	b	44	c
$Ca_{EUF-F2}^{\#}$	15	24	18	19	15	13	25	25	14	13	21	a	32	b	55	c
$P_{EUF-F1}^{\#}$	2,4	2,5	1,7	3,3	2,8	1,9	1,9	2,0	1,0	1,9	2,3		2,4		2,2	ns
$P_{EUF-F2}^{\#}$	1,2	1,4	1,2	1,6	1,2	1,2	1,2	0,9	0,4	0,9	1,0	a	1,1	ab	1,3	b
$K_{EUF-F1}^{\#}$	8	9	13	11	7	7	13	8	7	9	9,2		10,0		9,6	ns
$K_{EUF-F2}^{\#}$	4	5	6	6	4	3	6	5	4	4	4,9	a	5,2	a	6,3	b
pH-Wert	6,3	7,0	6,5	6,6	6,7	6,7	6,5	6,7	6,6	6,5	6,6	a	6,9	b	7,1	c

[mg (100 g Boden)⁻¹]

Bodenproben und -untersuchung

24 Wochen nach der Kalkung im Frühjahr des Rübenanbaujahres wurden Bodenproben von den Parzellen ohne K- und Mg-Düngung aus dem Oberboden (0-30 cm) entnommen. Dafür wurden in der Mitte der Parzellen 10 Einstiche mit einem Göttinger Bohrstock durchgeführt. Die daraus erstellte Mischprobe wurde bei 40 °C über 72 Stunden getrocknet, anschließend gemahlen und auf eine Partikelgröße von 2 mm gesiebt. Die Extraktion der Nährstoffe erfolgte mittels EUF (Németh, 1979). Es wurden zwei Fraktionen erfasst, wobei die erste Fraktion bei 20 °C und maximal 200 V über 30 Minuten extrahiert wurde und die sofort pflanzenverfügbaren Nährstoffe darstellt. Im Anschluss daran folgte die Extraktion der zweiten Fraktion bei 80 °C und maximal 400 V über 5 Minuten; diese beinhaltet die nachlieferbaren Nährstoffe des Bodens (Németh, 1985). Der P-Gehalt im Extrakt wurde photometrisch (Murphy und Riley, 1962) im Continuous-Flow-Verfahren (SKALAR Analytical B.V., Breda, NL) gemessen. Der K- und Ca-Gehalt wurde emissionspektrometrisch mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve) bestimmt.

Versuchsdurchführung Phase 2

Die Aussaat der Zuckerrüben erfolgte im Zeitfenster der Hauptaussaat des jeweiligen Anbaugesbietes zwischen dem 14.3. und 7.4.2011 sowie dem 23.3. und 2.4.2012 in 6-reihigen (2011) und 9-reihigen (2012) Parzellen mit einer Länge zwischen 8 und 10,5 m. An 8 Standorten wurde die Sorte Schubert (ZR 1883) (BSA, 2012) gesät, an den im Rhizoctonia-Verdachtsgebiet liegenden Standorten 4 und 8 die Sorte Nauta (ZR 1555). Die Ablagetiefe variierte je nach Standort zwischen 1 und 3 cm. Der Abstand in der Reihe lag je nach Reihenweite zwischen 6 und 8 cm. Die N-Düngung erfolgte zur Aussaat an allen Standorten einheitlich mit 80 kg N ha⁻¹ (Kalkammonsalpeter) auf den Parzellen, die im Herbst mit unterschiedlichen Mengen K und Mg gedüngt wurden. Weitere Parzellen, die im Herbst einheitlich 200 kg K₂O ha⁻¹ und 30 kg MgO ha⁻¹ erhalten hatten, wurden mit einer gestaffelten N-Düngung versehen (0, 40, 80, 120, 160 und 200 kg N ha⁻¹). Um Salzschäden zu vermeiden wurde die N-Gabe der beiden hohen Stufen geteilt. Zur Aussaat wurden hier 120 kg N ha⁻¹ gedüngt, die übrige Menge folgte in den entsprechenden Varianten im 4- bis 6-Blatt-Stadium der Zuckerrübe. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Zuckerrüben auf eine Bestandesdichte von 90.000 bis 94.000 Pflanzen je ha vereinzelt. Die Pflanzenschutzmaßnahmen erfolgten standortspezifisch nach örtlicher und regionaler Empfehlung.



Ernte, Probenahme und Qualität von Zuckerrüben

Aus jeder Parzelle wurden Blatt und Rübe von drei Reihen (10 m²) geerntet. Die Zuckerrüben wurden zunächst von Hand unterhalb der grünen Blattansätze geköpft (Beiß, 1979). Von Blättern und Rübenkopf, nachfolgend als Blatt bezeichnet, wurde der Frischmasseertrag erfasst. Ein repräsentatives Aliquot davon wurde bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend auf eine Partikelgröße < 1 mm gemahlen.

Die maschinell geernteten Rüben wurden gewaschen, gewogen und anschließend zu Brei verarbeitet. Ein Teil des Breis wurde auf die qualitätsbestimmenden Parameter K und Na flammenphotometrisch, α -Amino-Stickstoff (AmN) fluorometrisch (Burba und Georgi, 1975, 1976) und Zuckergehalt (ZG) polarimetrisch (ICUMSA, 1994) untersucht. Ein anderer Teil des Rübenbreis wurde bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gemahlen (< 0,5 mm).

Pflanzenaufschluss und Nährstoffanalyse

Zur Untersuchung der von Rübe und Blatt aufgenommenen Nährstoffe wurden 0,5 g des gemahlene Pflanzenmaterials der Varianten der K- und Mg-Steigerung sowie die 0, 80 und 160 kg N ha⁻¹ Varianten der N-Steigerung in einem Mikrowellendruckaufschluss mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid nach Lemme et al. (2014) aufgeschlossen. Die qualitative und quantitative Analyse der Nährstoffe im Eluat erfolgte emissionsspektrometrisch mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve).

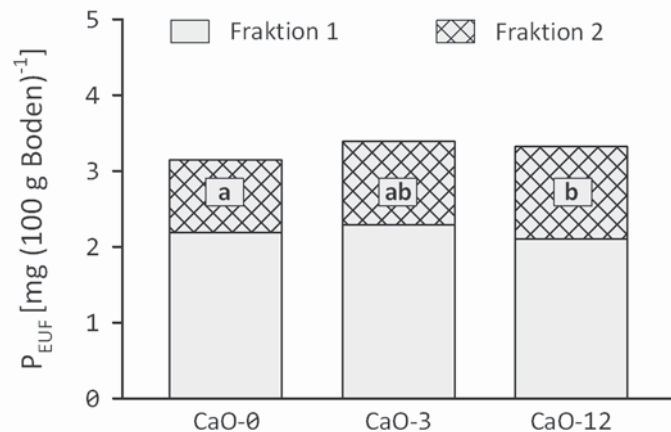


Abb. 2: Einfluss einer Branntkalk-Düngung (0, 3, 12 t CaO ha⁻¹) auf EUF-extrahierbaren Phosphor (P_{EUf}) in der 1. und 2. EUF-Fraktion im Boden 24 Wochen nach der Kalkung. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich in Fraktion 2 nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test). Die Kalkung hatte keinen signifikanten Einfluss auf P_{EUf} in Fraktion 1 und auf die Summe Fraktion 1+2

Statistische Auswertung

Die Auswertung der Daten wurde mit dem Statistikpaket SAS v9.2 (SAS Institute Inc., Cary, USA) durchgeführt. Für die Verrechnung der Hauptwirkung Kalk auf Nährstoffgehalt, Nährstoffentzug sowie Ertrag und Qualität der Zuckerrüben wurden die



Varianten mit differenzierter K-, Mg- und N-Düngung als separate Umwelten betrachtet. Dabei ergaben sich 88 Umwelten für die Auswertung der Hauptwirkung Kalk auf Nährstoffgehalt und Nährstoffentzug. Ertrag und Qualität der Zuckerrüben wurden anhand von 118 Umwelten verrechnet. Außerdem wurden auf Basis der 3 Varianten der K-Steigerung 0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹ (entsprechend K₂O-0, K₂O-200, K₂O-400) in den Kalkstufen CaO-0 und CaO-3 die beiden Hauptwirkungen (K- und Kalkdüngung) sowie deren Wechselwirkung auf Nährstoffgehalt, Ertrag und Qualität der Zuckerrübe separat dargestellt. Für die ein- und zwei-faktorielle Varianzanalyse wurde die Prozedur MIXED verwendet (Littell et al., 1996), wobei Standorte und Umwelten als zufällig betrachtet wurden. Normalverteilung und Varianzhomogenität wurden mithilfe der Prozeduren UNIVARIATE und GPLOT geprüft.

Der Nährstoffentzug errechnete sich aus dem Produkt von Nährstoffgehalt und Trockenmasseertrag und ist in kg Reinnährstoff je ha dargestellt. Die Umrechnung in die Oxidform erfordert den Faktor 2,2914 für P und 1,205 für K. Der Bereinigte Zuckerertrag (BZE) wurde aus Rübenfrischmasseertrag (RE_{FM}), ZG und technologischer Qualität berechnet (Märländer et al., 2003).

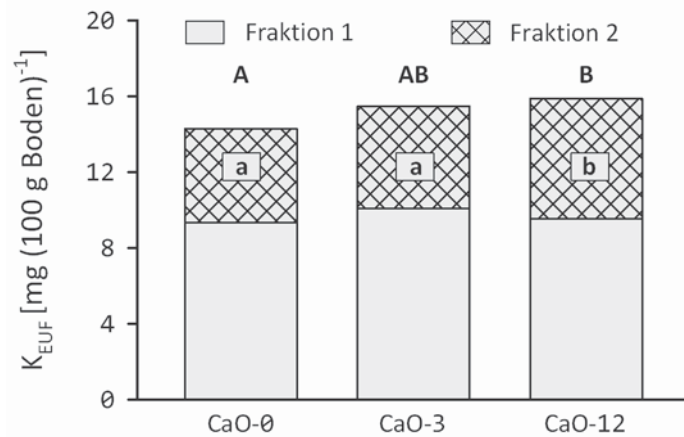


Abb. 3: Einfluss einer Branntkalk-Düngung (0, 3, 12 t CaO ha⁻¹) auf EUF-extrahierbares Kalium (K_{EUF}) in der 1. und 2. EUF-Fraktion im Boden 24 Wochen nach der Kalkung. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichen Buchstaben (Kleinbuchstaben Fraktion 2, Großbuchstaben Summe Fraktion 1+2) unterscheiden sich nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test). Die Kalkung hatte keinen signifikanten Einfluss auf K_{EUF} in Fraktion 1

Ergebnisse

Bodenuntersuchung

Zwischen den Kalk-Düngevarianten CaO-0, CaO-3 und CaO-12 zeigten sich 24 Wochen nach der Kalkung keine Unterschiede im EUF-P-Gehalt der ersten Fraktion (Abb. 2 & Tab. 2). Der EUF-P-Gehalt der zweiten Fraktion stieg in der Variante CaO-12 gegenüber der nicht gekalkten Variante um 0,3 mg P auf 1,3 mg P je 100 g Boden signifikant an. Die

Gesamtgehalte an EUF-P stiegen tendenziell aber nicht signifikant infolge der Kalkdüngung an.

Der Gesamtgehalt an EUF-K und der Gehalt der zweiten EUF-K-Fraktion stiegen in Variante CaO-12 gegenüber Variante CaO-0 um 1,8 mg K und 1,4 mg K je 100 g Boden an (Abb. 3 & Tab. 2). Die erste EUF-K-Fraktion blieb unbeeinflusst von der Kalkung, ebenso wie der Gesamtgehalt an EUF-K in den Parzellen der Varianten CaO-0 und CaO-3 (Tab. 2).

Tabelle 3a: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf Gehalt und Entzug von Phosphor (P) und Kalium (K) in Zuckerrüben im Mittel von 88 Umwelten an 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)

Parameter	CaO-0	CaO-3	
P-Gehalt Blatt [#]	2,38	2,35	ns
P-Gehalt Rübe [#]	1,08 a	1,07 b	
K-Gehalt Blatt [#]	37,0	37,3	ns
K-Gehalt Rübe [#]	5,46 a	5,39 b	
P-Entzug Blatt ⁺	21,6	21,1	ns
P-Entzug Rübe ⁺	23,2	23,2	ns
K-Entzug Blatt ⁺	335	333	ns
K-Entzug Rübe ⁺	116	117	ns
P-Entzug gesamt ⁺	44,7	44,2	ns
K-Entzug gesamt ⁺	452	450	ns

[#] [g kg⁻¹ TM] ⁺ [kg ha⁻¹]

Tabelle 3b: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 118 Umwelten an 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)

Parameter	CaO-0	CaO-3	
Rüben-Frischmasseertrag [*]	94,8 a	96,2 b	
Blatt-Trockenmasseertrag [*]	9,29	9,24	ns
Kaliumgehalt Brei [*]	34,9	34,6	ns
Natriumgehalt Brei [*]	3,96	3,94	ns
α-Amino-N-Gehalt Brei [*]	9,66	9,76	ns
Zuckergehalt [^]	17,6	17,6	ns
Bereinigter Zuckerertrag [*]	15,0 a	15,3 b	

^{*} [t ha⁻¹] ^{*} [mmol kg⁻¹ FM] [^] [%]

Pflanzenanalyse, Ertrag und Qualität der Zuckerrübe

Im Mittel der 88 Umwelten wurden die Nährstoffgehalte im Blatt von der Kalkdüngung nicht beeinflusst (Tab. 3a). Der P- und K-Gehalt der Rübe war in Variante CaO-3 gegenüber CaO-0 geringfügig, aber signifikant niedriger. Der Nährstoffentzug änderte sich durch die Kalkung nicht, ebenso wenig wie die Gehalte an K, Na, AmN und Zucker in der Rübe im Mittel der 118 Umwelten (Tab. 3b). Dagegen stiegen der RE_{FM} in den gekalkten Varianten um 1,4 t ha⁻¹ und der BZE um 0,3 t ha⁻¹ signifikant an (Tab. 3b).

Werden die Varianten der K-Steigerung hinsichtlich des Effektes der Kalkdüngung separat betrachtet, ergaben sich signifikant niedrigere P-Gehalte im Mittel der drei mit Kalk

gedüngten (CaO-3) gegenüber den drei nicht gekalkten Varianten (Tab. 4). Dabei lag der P-Gehalt im Mittel der gekalkten Varianten im Blatt um $0,08 \text{ g P kg}^{-1} \text{ TM}$ und in der Rübe um $0,02 \text{ g P kg}^{-1} \text{ TM}$ geringfügig aber signifikant niedriger als in den Varianten ohne Kalk (Tab. 5). Da der RE_{FM} zwischen den Varianten keinen signifikanten Unterschied aufwies (Tab. 4), spiegelten sich die niedrigen P-Gehalte in den gekalkten Varianten auch in einem signifikant geringeren P-Entzug wider (Tab. 5).

Bei alleiniger Betrachtung der Varianten der K-Steigerung im Hinblick auf den Effekt der K-Düngung, zeigte sich ein signifikanter Einfluss auf die Parameter K und ZG (Tab. 4). Dabei stieg der ZG im Mittel der K_2O-200 Varianten gegenüber den K_2O-0 Varianten signifikant an, während K_2O-400 keinen weiteren Anstieg bewirkte (Tab. 6). Lediglich der K-Gehalt in der Rübe stieg im Mittel der K_2O-400 Varianten weiter an. Außerdem resultierte die K-Düngung in einem höheren BZE, wobei die höchste gegenüber der mittleren Düngestufe keinen weiteren Mehrertrag erzielte.

Bei Betrachtung der K-Düngewirkung differenziert für die Varianten mit und ohne

Kalkdüngung, wurde kein Einfluss auf K-Gehalt und K-Entzug von Rübe und Blatt festgestellt (Abb. 4). Auch die übrigen Inhaltsstoffe in Rübe und Blatt unterlagen keinen Wechselwirkungen zwischen K- und Kalk-Düngung (Tab. 4). Einzig am BZE wurde deutlich, dass eine K-Düngung bei zuvor erfolgter Kalkung zu einem Mehrertrag gegenüber der Variante ohne K-Düngung führte (Abb. 5).

Tabelle 4: Signifikanz der Effekte von Kalk- und Kaliumdüngung und deren Wechselwirkung auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. ns = nicht signifikant; *, **, *** = signifikant bei $p \leq 0,05, 0,01, 0,001$ (ANOVA F-Test)

Parameter	Kalk-Düngung	Kali-Düngung	Kalk- x Kali-Düngung
P-Gehalt Blatt	*	ns	ns
P-Gehalt Rübe	*	ns	ns
K-Gehalt Blatt	ns	**	ns
K-Gehalt Rübe	ns	***	ns
P-Entzug Blatt	ns	ns	ns
P-Entzug Rübe	ns	ns	ns
K-Entzug Blatt	ns	***	ns
K-Entzug Rübe	ns	***	ns
P-Entzug gesamt	*	*	ns
K-Entzug gesamt	ns	***	ns
Rüben-Frischmasseertrag	ns	ns	ns
Blatt-Trockenmasseertrag	ns	***	ns
Kaliumgehalt Brei	ns	***	ns
Natriumgehalt Brei	ns	ns	ns
α -Amino-N-Gehalt Brei	ns	ns	ns
Zuckergehalt	ns	***	ns
Bereinigter Zuckerertrag	ns	**	*



Diskussion

Die Düngeberatung hat bislang keine Erkenntnisse darüber, wie Wechselwirkungen zwischen Nährstoffen nach einer Kalkung in der praktischen Düngeempfehlung berücksichtigt werden können. Dies gilt insbesondere für Böden, deren pH-Werte im Grenzbereich zwischen sauer zu neutral liegen.

Ziel der Versuchsserie war es somit, auf schwach sauren bis neutralen Böden Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen gedüngtem Kalk und den Nährstoffen P und K in Boden und Zuckerrüben sowie deren Ertrag und Qualität zu gewinnen.

Phosphor

Die Kalkdüngung in pflanzenbaulich relevantem Maß (CaO-3) führte zu keiner signifikanten Veränderung der EUF extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Obwohl der EUF-P-Gehalt in der zweiten Fraktion von Variante CaO-3 bereits tendenziell anstieg, war der Unterschied zu Variante CaO-0 erst in Variante CaO-12 signifikant (Abb. 2). Da aber der EUF-P-Gehalt in der ersten Fraktion von CaO-12 gegenüber CaO-0 unverändert blieb, der Gesamtgehalt an EUF-P nur tendenziell stieg, ist mit den vorliegenden Ergebnissen keine Aussage über die Herkunft des in der zweiten Fraktion von CaO-12 zusätzlich gemessenen EUF-P möglich. Es kann also kein Nachweis darüber geführt werden, ob das zusätzlich gemessene EUF-P aus einer Verschiebung von P aus der ersten in die zweite Fraktion resultierte, oder zusätzlich zu dem in Variante CaO-0 gemessenen Gehalten aufgrund der Kalkung von den Austauschern nachgeliefert wurde. Aus den Ergebnissen der Gewächshausexperimente von Lemme et al. (2014) kann aber abgeleitet werden, dass eine Verschiebung von EUF-P aus der ersten Fraktion in die zweite Fraktion bei gleich bleibendem Gesamt-EUF-P nicht vorliegt. Lemme et al. (2014) extrahierten aus vergleichbaren Böden mehr P in beiden EUF-Fraktionen mit zunehmenden äquivalenten Kalkmengen (0, 4 und 12 t CaO ha⁻¹). Es ist also davon auszugehen, dass auf den geprüften schwach sauer bis neutral reagierenden Parabrauerden aus Löss die Zufuhr von Kalk bis 12 t CaO ha⁻¹ die P-Desorption von Al- und Fe-Hydroxiden aufgrund des gestiegenen pH-Wertes fördert, ohne dass das desorbierte P umgehend in Ca-Phosphaten gebunden wird (Németh, 1985).



Der von Haynes und Ludecke (1981) beschriebene positive Einfluss der Kalkung eines sauren Bodens auf den P-Entzug zweier Kleearten wurde auf den verwendeten schwach sauren bis neutralen Böden nicht bestätigt. Im Gegensatz dazu zeigte das Mittel der Varianten mit differenzierter K-Düngung nach der Kalkung sogar einen niedrigeren P-

Tabelle 5: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (entsprechend CaO-0 und CaO-3) auf den Phosphor (P)-Gehalt und P-Entzug von Zuckerrüben in den Varianten der Kaliumsteigerung im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test)

Parameter	CaO-0	CaO-3
P-Gehalt Blatt [#]	2,39 a	2,31 b
P-Gehalt Rübe [#]	1,08 a	1,06 b
P-Entzug gesamt ⁺	44,9 a	43,7 b
[#] [g kg ⁻¹ TM]	⁺ [kg ha ⁻¹]	

Entzug in Rübe und Blatt (Tab. 5). Dieser ergab sich aufgrund der gesunkenen P-Gehalte in Rübe und Blatt in den gekalkten Varianten (Tab. 5) und des nicht beeinflussten RE_{FM} (Tab. 4). Im Mittel der umfassenderen Auswertung von 88 Umwelten (Tab. 3a) blieb der P-Entzug infolge der Kalkung unverändert. Der marginal niedrigere P-Gehalt der Rüben in der gekalkten Variante wurde durch einen höheren Ertrag ausgeglichen und resultierte in einem statistisch gleichen P-Entzug in den Varianten mit und ohne

Kalkdüngung. Das lässt auf einen Verdünnungseffekt schließen und führt zu der Frage einer ausreichenden P-Versorgung in der gekalkten Variante. Die in Rübe und Blatt gemessenen P-Gehalte lagen unter den von anderen Autoren (Schilling, 2000; Draycott und Christenson, 2003; Scheffer und Schachtschabel, 2010; Wendland et al., 2012) angegebenen durchschnittlichen Gehalten in Zuckerrüben zum Erntezeitpunkt. Allerdings galt dies sowohl für die ungekalkte wie auch die gekalkte Variante. Draycott und Christenson (2003) betonten aber, dass den von ihnen zitierten Werten Versuche aus den 1970er und 1980er Jahren zugrunde lagen, während die übrigen Autoren keine oder ungenügende Angaben zur Herkunft der angegebenen Nährstoffgehalte machten. Heyn und Horst (2004) berichteten von Feldversuchen zwischen 1996 und 2002, aus denen mit 1,2 g P kg⁻¹ TM bei einem RE_{FM} von 62 t ha⁻¹ ein durchschnittlicher P-Gehalt hervorging, der nahe dem in dieser Studie gemessenen P-Gehalt von 1,08 g P kg⁻¹ TM bei einem RE_{FM} von über 94 t ha⁻¹ lag.

Bei Betrachtung der EUF-P-Gehalte im Boden sind nach Wiklicky und Németh (1982) Gehalte von 1,25 bis 2,25 mg P (100 g Boden)⁻¹ in der ersten Fraktion ausreichend für einen Zuckerertrag von 10 t ha⁻¹. Bei einem durchschnittlich erzielten BZE von 15 t ha⁻¹ (Tab. 3b) und einem EUF-P-Gehalt von 2,3 mg P (100 g Boden)⁻¹ in der ersten Fraktion zu Vegetationsbeginn ist somit ein limitierender Einfluss der niedrigen P-Versorgung des Bodens nicht vollständig auszuschließen. Ein positiver Effekt der Kalkgabe auf den P-

Entzug wurde in den 88 Umwelten aber trotz niedriger P-Versorgung des Bodens nicht gefunden.

Kalium

In Variante CaO-12 wurde 24 Wochen nach der Kalkung mehr EUF-K gemessen als in Variante CaO-0 (Abb. 3). Da sich die erste Fraktion der Varianten CaO-0 und CaO-12 nicht unterschieden und dem Boden kein K zugeführt wurde, ist das zusätzlich gemessene K in

der zweiten Fraktion von Variante CaO-12 vermutlich von den Austauschern im Boden nachgeliefert worden.

Jackson und During (1979) zeigten, dass hydratisierte Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+}) in verwitterte 2:1 Tonminerale eindringen und diese aufweiten können. In der Folge dieser Aufweitung können andere Kationen das Zwischenschicht-K ersetzen (Jackson und During, 1979; Kong und

Steffens, 1989). Claassen und Jungk (1982) und Kuchenbuch und Jungk (1984) bestätigten die Nachlieferung von K aus den Zwischenschichten der Tonminerale bei einer niedrigen K-Konzentration in der Bodenlösung. Der Anstieg von EUF-K in der zweiten Fraktion von Variante CaO-12 ist also sehr wahrscheinlich auf das zusätzlich aus den Zwischenschichten der Tonminerale nachgelieferte K zurückzuführen (Németh und Ziegler, 1988; Mengel und Uhlenbecker, 1993).

Tabelle 6: Einfluss einer Kaliumdüngung mit 0, 200 und 400 kg K_2O ha^{-1} (entsprechend K_2O -0, K_2O -200 und K_2O -400) auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0,05$; ns = nicht signifikant (Tukey-Test)

Parameter	K_2O -0	K_2O -200	K_2O -400
K-Gehalt Blatt [#]	36,0 a	37,4 b	38,0 b
K-Gehalt Rübe [#]	5,20 a	5,40 b	5,62 c
K-Entzug Blatt ⁺	308 a	338 b	346 b
K-Entzug Rübe ⁺	111 a	118 b	122 b
K-Entzug gesamt ⁺	419 a	456 b	468 b
P-Entzug gesamt ⁺	43,3	44,8	44,8 ns
Rüben-Frischmasseertrag [*]	94,6	95,8	95,1 ns
Blatt-Trockenmasseertrag [*]	8,65 a	9,08 b	9,21 b
Kaliumgehalt Brei [*]	32,9 a	34,8 b	35,6 c
Natriumgehalt Brei [*]	3,73	3,93	3,65 ns
α -Amino-N-Gehalt Brei [*]	9,44	9,40	9,07 ns
Zuckergehalt [^]	17,5 a	17,7 b	17,7 b
Bereinigter Zuckerertrag [*]	14,9 a	15,3 b	15,2 b
[#] [g kg^{-1} TM]	⁺ [kg ha^{-1}]	[*] [t ha^{-1}]	[*] [mmol kg^{-1} FM] [^] [%]



Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass neben der Präsenz von aufweitbaren 2:1 Tonmineralen eine ausreichende Ca-Versorgung benötigt wird, um das Zwischenschicht-K zu mobilisieren. So wird erst in Variante CaO-12 die bei Németh et al. (1989) beschriebene Grenze von $40 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$ in der zweiten EUF-Fraktion für eine optimale Ca-Versorgung überschritten (Tab. 2). Diesen Effekt belegen auch die Ergebnisse von Lemme et al. (2014), die Gefäßversuche mit vergleichbaren Böden anstellten. Dort wurde bereits bei einer äquivalenten Kalkmenge von 4 t CaO ha^{-1} ein EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion von $40 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$ erreicht, zusammen mit einem signifikant höheren EUF-K-Gehalt in der zweiten Fraktion. Als Ursache für den Unterschied zu der vorliegenden Studie kommt neben der im Gefäßversuch homogeneren Verteilung des Kalkes im Gefäß auch die in den Feldversuchen aufgetretene Witterung in Betracht. So könnten Niederschläge eine Kalkverlagerung in tiefere Bodenschichten bewirkt und so dem Anstieg der EUF-Ca-Gehalte in der zweiten Fraktion auf über $40 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$ entgegen gewirkt haben.

Bei Várnai et al. (1985) resultierte die Kalkung eines sauren Bodens in einer reduzierten Extrahierbarkeit von EUF-K in beiden Fraktionen. Allerdings blieb in diesem Gefäßversuch der EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion trotz einer außergewöhnlich hohen Kalkgabe ($40 \text{ g CaO auf 18 kg Boden}$) mit $35 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$ unter der von Németh et al. (1989) beschriebenen Grenze von $40 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$. So wurde zwar der pH-Wert angehoben, eine ausreichende Versorgung mit Ca und eine damit genügend hohe Ca-Basensättigung konnte aber nicht erreicht werden. Laut Németh et al. (1989) werden $40 \text{ mg Ca (100 g Boden)}^{-1}$ in der zweiten Fraktion benötigt, um die angestrebte Ca-Basensättigung von 50 % bis 80 % zu erreichen, die für eine stabile Krümelstruktur benötigt wird (Mengel, 1984).

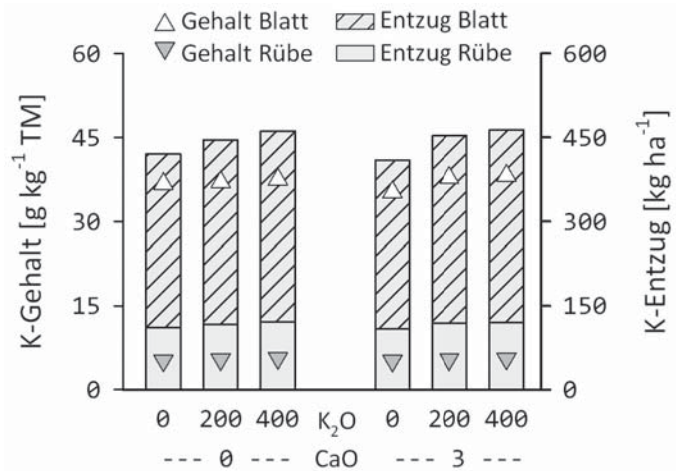


Abb. 4: Einfluss einer Branntkalk- (0 und 3 t CaO ha⁻¹) und Kaliumdüngung (0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹) auf den Kalium (K)-Gehalt und den K-Entzug von Rübe und Blatt der Zuckerrübe. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Die Wechselwirkung von Kalk- und Kaliumdüngung war ohne signifikanten (ns) Einfluss auf die Messparameter bei $p \leq 0,05$ (F-Test)



Zur Rübenaussaat lag kein Unterschied im EUF-K-Gehalt des Bodens zwischen den beiden Kalk-Varianten CaO-0 und CaO-3 vor, obwohl der EUF-K-Gehalt in der zweiten Fraktion sowie die Summe beider Fraktionen tendenziell angestiegen war (Abb. 3). Dennoch war der K-Gehalt der Rüben in den gekalkten Parzellen geringer als in den Parzellen ohne Kalk (Tab. 3a). Dies ist aber nicht dem Effekt einer geringeren K-Versorgung aus dem Boden durch die Kalkung zuzuordnen, sondern das Resultat des höheren RE_{FM} in den Parzellen mit Kalk (Tab. 3b). Dies wird durch den K-Entzug ersichtlich, der zwischen den Kalk-Varianten keinen Unterschied aufwies (Tab. 3a). Ebenso wie zuvor schon für P

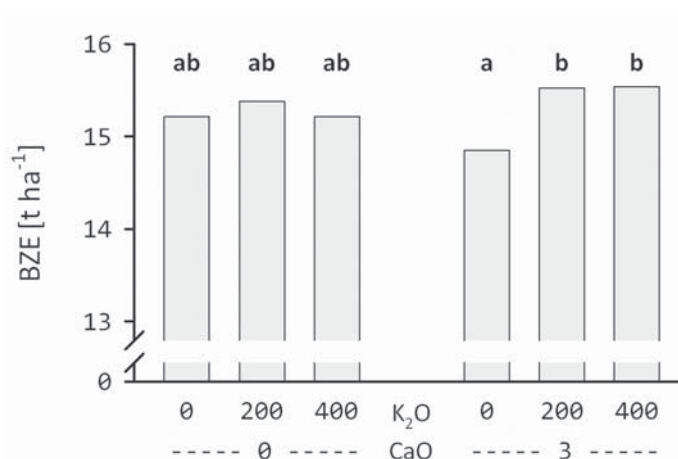


Abb. 5: Einfluss einer Branntkalk- (0 und 3 t CaO ha⁻¹) und Kaliumdüngung (0, 200, 400 kg K₂O ha⁻¹) auf den Bereinigten Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrüben. Mittel von 5 Standorten 2011 und 5 Standorten 2012 im Süden und der Mitte Deutschlands. Mittelwerte mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p \leq 0,05$ (Tukey-Test)

beschrieben, ist auch der K-Gehalt in Rübe und Blatt von beiden Kalk-Varianten im Vergleich zu den in der Literatur angegebenen Werten sehr niedrig (Schilling, 2000; Scheffer und Schachtschabel, 2010).

Während Wendland et al. (2012) mit 9 g K kg⁻¹ TM einen rund 35 % höheren K-Gehalt in der Rübe angaben, als es die Ergebnisse der vorliegenden Versuche zeigen (Tab. 3a und Tab. 6), berichteten Heyn und Horst (2004) mit

6,5 g K kg⁻¹ TM von einem K-Gehalt, der nur geringfügig über den in dieser Studie gemessenen Werten lag (Tab. 3a). Eine ertragslimitierende K-Unterversorgung der Rüben kann hier ausgeschlossen werden, da einerseits der K-Entzug von ca. 450 kg K ha⁻¹ (Tab. 3a) im oberen Bereich der von Draycott und Christenson (2003) angegebenen Entzüge lag. Andererseits zeigten die Ergebnisse der K-Steigerung zwar einen mit jeder K-Stufe steigenden K-Gehalt in der Rübe, der K-Entzug wurde aber in Variante K₂O-400 gegenüber K₂O-200 nicht weiter angehoben (Tab. 6). Bei Milford et al. (2000) lag der K-Entzug der Rübe in 26 Versuchen zwischen 70 und 120 kg K ha⁻¹. Beachtenswert ist dabei, dass die K-Gehalte von einem niedrigen RE_{FM} von ca. 30 t ha⁻¹ mit steigendem RE_{FM} bis zu Werten von 60 bis 70 t ha⁻¹ linear anstiegen. Bei weiter steigenden Erträgen > 70 t ha⁻¹ nahmen die K-Gehalte um bis zu 30 % ab. Obwohl bei Milford et al. (2000) mit hohen RE_{FM} ein Verdünnungseffekt des K-Gehaltes eintrat, lagen die K-Gehalte mit rund 6 bis



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

15 g kg⁻¹ TM ebenfalls deutlich über den in dieser Studie gemessenen Werten. Trotz der vergleichsweise niedrigen K-Gehalte wurden in den vorgestellten Feldversuchen keine K-Mangelsymptome beobachtet. Ein weiterer Aspekt im Hinblick auf geringere K-Gehalte in der Zuckerrübe ist der Einfluss der Züchtung. Seit Einführung von qualitätsorientierten Bezahlungs-systemen im Zuckerrübenanbau erfolgt eine Selektion in Richtung K-effizienter Sorten (Hoffmann, 2006). Zusammen mit einer seit dem Beginn der 1980er Jahre stetig reduzierten K-Düngung (Fürstenfeld und Horn, 2010) dürfte dies zu geringeren K-Gehalten in den derzeit angebauten, im BZE weitaus leistungsfähigeren Zuckerrübensorten geführt haben.

In der vorliegenden Studie stiegen RE_{FM} und BZE infolge der Kalkung geringfügig an (Tab. 3b). Grass und Budig (1976) berichteten von einer umfangreichen Versuchsserie mit Kalk. Zwischen 1965 und 1972 wurden dort Versuche an 22 Standorten mit Ausgangs-pH zwischen 4,5 und 6,2 und verschiedenen Kulturen durchgeführt. Dabei konnte durch die Kalkung auf ein Ziel-pH von 6,5 und 7,0 im Mittel über alle Versuche ein Mehrertrag von 3 % erreicht werden. Zuckerrüben erzielten mit Kalkdüngung 8 % höhere Erträge, während der Ertragszuwachs der vorliegenden Studie in weniger als 2 % zusätzlichem Ertrag durch Kalkung resultierte.

Während die Qualitätsparameter der Rübe durch eine Kalkdüngung unverändert blieben, bewirkte die K-Düngung einen steigenden K-Gehalt in der Rübe und einen geringfügig erhöhten ZG (Tab. 6). Diese Ergebnisse bestätigen den bei Bürcky et al. (1978) dargestellten Einfluss einer K-Düngung von Zuckerrüben im Gefäßversuch.

Die Ursache für die Wechselwirkung zwischen K- und Kalkdüngung auf den BZE (Abb. 5) ist auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig zu erklären. Obwohl die betrachteten Parameter Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität der Rübe keine signifikanten Unterschiede erbrachten (Tab. 4 & Abb. 4), war in den gekalkten Varianten eine K-Düngung nötig, um das Niveau des BZE auf dem der ungekalkten Varianten sicherzustellen. Vermutlich fällt dieser Effekt auf weniger ertragreichen Böden mit geringerer Pufferkapazität deutlicher aus und somit wird das von Ehrenberg (1920) formulierte Kalk-Kali-Gesetz bestätigt.

Grass und Budig (1976) wiesen darauf hin, dass die in ihrer Versuchsserie gefundenen Effekte keineswegs allein der direkten Wirkung des Ca zuzuschreiben sind, sondern auch auf indirekten Wirkungen wie der Aktivierung des Bodenlebens, der Verbesserung der



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

Struktur, der Erhöhung der Regenverdaulichkeit und der allgemein besseren Verfügbarkeit von Nährstoffen beruhen können. Dies muss auch für die hier dargestellten Ergebnisse vermutet werden. Eine Unterversorgung der Zuckerrüben mit Ca in Variante CaO-0 ist bei EUF-Ca-Gehalten von über 20 mg Ca (100 g Boden)⁻¹ je Fraktion auszuschließen (Tab. 2). Nicht ausreichend sind diese EUF-Ca-Gehalte aber für Struktur und Puffervermögen des Bodens. Obwohl der pH-Wert mit 6,6 im optimalen Bereich lag (VDLUFA, 2000), fehlte dieser Variante Ca, um die bereits erwähnte Grenze von 40 mg Ca (100 g Boden)⁻¹ in der zweiten Fraktion zu erreichen (Németh et al., 1989).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die durch eine Kalkdüngung hervorgerufenen Effekte in Boden und Zuckerrüben durchweg gering ausfielen. Auch die Wechselwirkung mit der zusätzlich ausgebrachten K-Düngung fiel gering aus, betrifft aber mit dem BZE einen bedeutenden Parameter. Lemme et al. (2014) zeigten in ihren Gefäßversuchen deutlichere Effekte der Kalkdüngung. Dafür können die kontrollierten Bedingungen in Gefäßversuchen als Ursache vermutet werden, aber auch die nicht zu erklärenden Effekte des komplexen Systems zwischen Boden, Witterung und Pflanze in Feldversuchen.

Schlussfolgerungen

Bei Betrachtung der gesamten Versuchsserie ergab die Düngung von Branntkalk mit praxisüblicher Menge keinen relevanten Einfluss auf den mittels EUF extrahierbaren P- und K-Gehalt im Boden. Obwohl einzelne Inhaltsstoffe der Rübe durch die Kalkgabe geringfügig gesenkt wurden, stieg der BZE infolge eines positiven Einflusses auf den RE_{FM} etwas an. Die Ergebnisse ergeben keinen Anlass, die bisherige Vorgehensweise bei der Berechnung der Düngeempfehlung für P und K anzupassen.

In den Varianten mit einer K-Düngung zusätzlich zur Kalkung zeigte sich auf den untersuchten Parabraunerden aus Löss, dass nach der Kalkdüngung die Varianten mit einer K-Düngung den höheren BZE erzielten. Um diese Ergebnisse zu validieren, sollten in Folgeuntersuchungen Standorte mit pH-Werten zwischen 6,0 und 6,3 einbezogen werden sowie Standorte mit EUF-Ca-Gehalten in der zweiten Fraktion im Grenzbereich der Kalkbedürftigkeit zwischen 30 und 40 mg Ca (100 g Boden)⁻¹.

In der vorliegenden Untersuchung wurden in den Zuckerrüben P- und K-Gehalte gemessen, die durchweg niedriger lagen als die der Standard-Tabellenwerke. Nährstoffgehalte, die unterhalb der bislang üblichen Werte liegen, bedeuten eine Überschätzung der Nährstoffentzüge der Zuckerrübe. Dies ist für die Düngeberatung von Bedeutung, aber auch



für Cross Compliance relevante Themen wie der Erstellung eines Nährstoffvergleichs nach Düngeverordnung.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt den Kollegen der Arbeitsgemeinschaften für Versuchswesen und Beratung im süddeutschen Zuckerrübenanbau, der Rübenabteilungen der Südzucker AG und des Instituts für Zuckerrübenforschung für die Unterstützung bei Planung und Durchführung der Feldversuche und den anschließenden Untersuchungen. Die Finanzierung des Projekts erfolgte in Zusammenarbeit von K+S KALI GmbH in Kassel, Südzucker AG, EUF-Arbeitsgemeinschaft, Kuratorium für das Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau und Bodengesundheitsdienst GmbH in Ochsenfurt.

Literatur

- Beckett, P.H.T., Nafady, M.H.M., 1967. Potassium-calcium exchange equilibria in soils: The location of non-specific (Gapon) and specific exchange sites. *Journal of Soil Science* 18, 263–281.
- Beiß, U., 1979. Bewertung von Rüben mit Kopfanteil. *Deutsche Zuckerrübenzeitung* 15, 5.
- BSA, 2012. Beschreibende Sortenliste. Bundessortenamt, Hannover.
- Burba, M., Georgi, B., 1975. Die fluorometrische Bestimmung der Aminosäuren in Zuckerrüben und Zuckerfabrikprodukten mit Fluoreszamin und o-Phthalaldehyd. *Zuckerindustrie* 25, 667–673.
- Burba, M., Georgi, B., 1976. Die fluorometrische Bestimmung der Aminosäuren in Zuckerrüben und Zuckerfabrikprodukten mit Fluoreszamin und o-Phthalaldehyd. *Zuckerindustrie* 26, 322–329.
- Bürcky, K., Beiß, U., Winner, C., Draht, L., Schiweck, H., 1978. Versuche zur bedeutung des Nährstoffangebotes für die Qualität der Zuckerrübe II. Stickstoff und Kalium. *Zuckerindustrie* 103, 190–200.
- Claassen, N., Jungk, A., 1982. Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden in Beziehung zur Kaliumaufnahme von Maispflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 145, 513–525.
- Draycott, A.P., Christenson, D.R., 2003. *Nutrients for Sugar Beet Production*. CABI, Oxon.



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

- Ehrenberg, P., 1920. Das Kalk-Kali-Gesetz, Landwirtschaftliche Jahrbücher. ed. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin.
- Fürstenfeld, F., Horn, D., 2010. Gezielte Düngung - ein Beitrag zur nachhaltigen Landwirtschaft. Zuckerindustrie 135, 570–571.
- Grass, K., Budig, M., 1976. Kalkwirkung in Ackerlandversuchen. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 33/I, 95–105.
- Haynes, R.J., 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. Plant and Soil 68, 289–308.
- Haynes, R.J., Ludecke, T.E., 1981. Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legumes as affected by lime and phosphorus availability. Plant and Soil 62, 241–254.
- Heyn, J., Horst, H., 2004. Zur Nährstoffabfuhr durch Zuckerrüben, In: Kongressband 2003. ed. VDLUFA-Schriftenreihe 59, Saarbrücken, 383-390.
- Hoffmann, C., 2006. Zuckerrüben als Rohstoff, Habilitationsschrift. ed. Universität Göttingen.
- ICUMSA, 1994. Methods book. Method GS6-3: The determination of the polarisation of sugar beet by the macerator or cold aqueous digestion method using aluminium sulphate as clarifying agent - official. In: International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. Bartens, Berlin.
- Jackson, B.L.J., During, C., 1979. Studies of slowly available potassium in soils of New Zealand I. Effects of leaching, temperature and potassium depletion on the equilibrium concentration of potassium in solution. Plant and Soil 51, 197–204.
- Kong, T., Steffens, D., 1989. Bedeutung der Kalium-Verarmung in der Rhizosphäre und er Tonminerale für die Freisetzung von nichtaustauschbarem Kalium und dessen Bestimmung mit HCl. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 152, 337–343.
- Kuchenbuch, R.O., Jungk, A., 1984. Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 147, 435–448.



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

- Lemme, H., Koch, H.-J., Horn, D., Märländer, B., 2014. Effect of liming on EUF extractable and plant available phosphorus and potassium in pot trials with sugar beet. *Sugar Industry* 139, 48–57. (In German).
- Littell, R.C.M., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., 1996. SAS systems for mixed models. Cary, New York.
- Märländer, B., Hoffmann, C., Koch, H.-J., Ladewig, E., Merkes, R., Peterson, J., Stockfisch, N., 2003. Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in Germany: Heading for sustainable development. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189, 201–226.
- Mengel, K., 1984. Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Fischer, Stuttgart.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. Principles of Plant Nutrition, 5th edition. ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande.
- Mengel, K., Uhlenbecker, K., 1993. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. *Soil Science Society of America Journal* 57, 761–766.
- Milford, G.F.J., Armstrong, M.J., Jarvis, P.J., Houghton, B.J., Bellett-Trevers, D.M., Jones, J., Leigh, R.A., 2000. Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status. *Journal of Agricultural Science* 135, 1–10.
- Moore, J.-D., Quimet, R., 2010. Effect of two Ca fertilizer types on sugar maple vitality. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 1985–1992.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31–36.
- Németh, K., 1976. Die effektive und potentielle Nährstoffverfügbarkeit im Boden und ihre Bestimmung mit Elektro-Ultrafiltration (EUF), Habilitationsschrift. ed. Universität Gießen.
- Németh, K., 1979. The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Advances in Agronomy* 31, 155–188.
- Németh, K., 1985. Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant and Soil* 83, 1–19.



Artikel 3: Einfluss von Kalk auf Boden und Zuckerrübe

- Németh, K., Bartels, H., Heuer, C., Ziegler, K., 1989. Confident and precise evaluation of the lime requirement using EUF. *Zuckerindustrie* 114, 336–338. (In German).
- Németh, K., Ziegler, K., 1988. Beziehungen zwischen den EUF-KFraktionen und den nach herkömmlichen Methoden gewonnenen K-Mengen und ihre Bedeutung für die Beurteilung der K-Versorgung des Bodens, In: *Kostensenkung und Umweltschutz*, 3. Intern. EUF-Symposium. ed. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 71-91.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 1992. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 13. Auflage. Enke, Stuttgart.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Auflage. Spektrum, Berlin.
- Schilling, G., 2000. *Pflanzenernährung und Düngung*. Ulmer, Stuttgart.
- Várnai, M., Eifert, J., Szöke, L., 1985. Effect of liming on EUF-nutrient fractions in the soil, on nutrient contents of grape leaves and on grape yield. *Plant and Soil* 83, 55–63.
- VDLUFA, 2000. Standpunkt „Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden“. Hrsg: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt.
- Wendland, M., Diepolder, M., Capriel, P., 2012. *Leitfaden zur Düngung von Acker- und Grünland*, 10. Auflage. ed. Kastner, Wolnzach.
- Wiklicky, L., Németh, K., 1982. Die anzustrebenden EUF-P-Gehalte im Zuckerrübenanbau. *Zuckerindustrie* 107, 607–611.

V. Epilog

Nachhaltige Produktivitätssteigerung – Herausforderung moderner Düngeberatung

Das Interesse der Gesellschaft an einer umweltverträglichen und ressourcenschonenden Landwirtschaft wächst stetig. Zusammen mit ökologischen und sozialen Aspekten umfasst das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft gleichermaßen auch ökonomische Aspekte (Christen und O'Halloran-Wietholtz 2002). In der Pflanzenproduktion hat die Nährstoffversorgung ackerbaulich genutzter Böden eine hohe Bedeutung und damit auch die mineralische Düngung, mit je nach Kultur 20 % bis 50 % der variablen Kosten. Der gesetzliche Rahmen für die Anwendung von Düngern ist die Düngeverordnung (DüV 2006). Der Schwerpunkt der DüV liegt auf dem Nährstoff Stickstoff. Die Nährstoffe Phosphor (P) und Kalium (K) stehen – entgegen ihrer Bedeutung für die Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturen – dort weniger im Fokus, sind aber dennoch Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Mit dem Ziel einer nachhaltigen Produktivitätssteigerung beschreibt Lemme (2014) die Erhöhung der Effizienz der P-Düngung, während in der vorliegenden Arbeit für die K-Düngung mögliche Nährstoffwechselwirkungen einer Kalkung betrachtet werden.

In den vergangenen Jahren wurde von abnehmenden P- und K-Gehalten im Boden berichtet mit einem zunehmenden Flächenanteil in den Versorgungsstufen A und B (Fürstenfeld und

Tabelle 1: Mittelwerte von Calcium- (Ca-) Karbonatgehalt, Basensättigung-Ca, pH-Wert sowie EUF-Ca und EUF-Kalium (K) in zwei Fraktionen (F1, F2) im Boden (0-30 cm) von 10 Versuchsstandorten in den Gruppen G1236 (n=7) und G45 (n=3) in Deutschland (2010, 2011) vor Versuchsbeginn.

Variablen	G1236 (n=7)	G45 (n=3)
Ca-Karbonatgehalt [%]	0.11	0.33
Basensättigung Ca [cmol _c kg ⁻¹]	9.65	11.77
pH	6.5	6.8
EUF Ca _{F1} [mg (100 g) ⁻¹]	21	30
EUF Ca _{F2} [mg (100 g) ⁻¹]	16	30
EUF K _{F1} [mg (100 g) ⁻¹]	8.2	10.9
EUF K _{F2} [mg (100 g) ⁻¹]	4.2	5.9

Horn 2010; Kurpjuweit 2013), sodass Mindererträge nicht auszuschließen sind (Fürstenfeld und Horn 2010). Dies betrifft insbesondere Zuckerrüben, die einen hohen Bedarf an K aufweisen. Für eine nachhaltige Produktivitätssteigerung des Anbaus von Zuckerrüben ist deshalb die Sensibilisierung der Landwirte für Pflanzenernährung und Nährstoffkreis-

läufe eine Herausforderung moderner Düngeberatung.

Zielgerichtete Düngung

Für eine fundierte Düngeberatung ist es zunächst notwendig, den Nährstoffstatus eines Standortes mittels Bodenuntersuchung zu bestimmen. Dies gilt insbesondere für Standorte an denen es infolge einer Kalkung zu Wechselwirkungen zwischen Nährstoffen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und damit dem Entzug der Pflanzen kommen kann. Das von Ehrenberg (1920) formulierte Kalk-Kali-Gesetz beschreibt einen geringeren K-Entzug infolge einer Kalkung ohne ausgleichende K-Düngung, verursacht durch einen unspezifischen Kationen-antagonismus, der auch die Extrahierbarkeit von K verändert. Aufgrund des breiten Analysespektrums können diese Nährstoffwechselwirkungen durch die Bodenuntersuchung mittels EUF besonders gut erfasst und in der Düngeberatung berücksichtigt werden. Für die Entwicklung einer differenzierten Düngeberatung ist es

zuvor aber notwendig, auf der Basis der Bodenuntersuchung eine sichere Diskriminierung von Standorten zu erreichen, an denen Nährstoffwechselwirkungen auftreten. Dies konnte mit der vorliegenden Arbeit gezeigt werden.

Um zunächst den Einfluss einer Kalkung auf die Extrahierbarkeit von K aus dem Boden zu untersuchen, wurde eine Versuchsserie von 62 Umwelten (Standort x Jahr) mit Lössböden ausgewählt. Diese sind für den Anbau von Zuckerrüben in Mitteleuropa weit verbreitet. Die

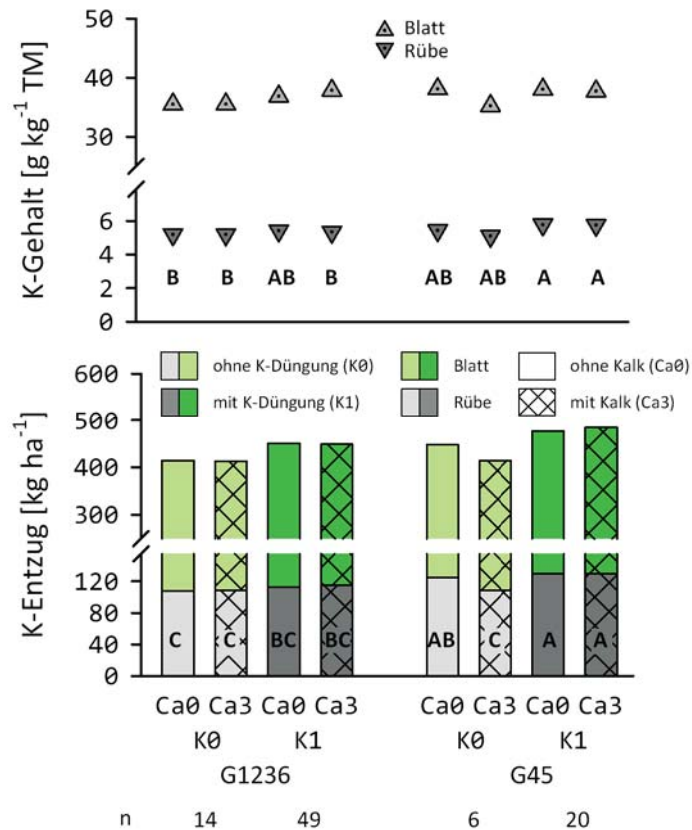


Abb. 1: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (Ca0, Ca3) sowie einer Kaliumdüngung mit 0 (K0) und 200/400 kg K₂O ha⁻¹ (K1) auf den Kaliumgehalt und -entzug von Zuckerrüben und Blatt in den Gruppen G1236 und G45. Die Ergebnisse resultieren in der Summe aus 89 Umwelten in Deutschland (2011, 2012). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0.05$.

zuvor aber notwendig, auf der Basis der Bodenuntersuchung eine sichere Diskriminierung von Standorten zu erreichen, an denen Nährstoffwechselwirkungen auftreten. Dies konnte mit der vorliegenden Arbeit gezeigt werden.

Um zunächst den Einfluss einer Kalkung auf die Extrahierbarkeit von K aus dem Boden zu untersuchen, wurde eine Versuchsserie von 62 Umwelten (Standort x Jahr) mit Lössböden ausgewählt. Diese sind für den Anbau von Zuckerrüben in Mitteleuropa weit verbreitet. Die



Auswertung zeigte, dass eine Kalkung dieser Böden mit 3 t CaO ha⁻¹ die Extrahierbarkeit von K im Mittel über alle Umwelten nicht verschlechterte, sondern tendenziell sogar verbesserte (Fischer et al. 2015a).

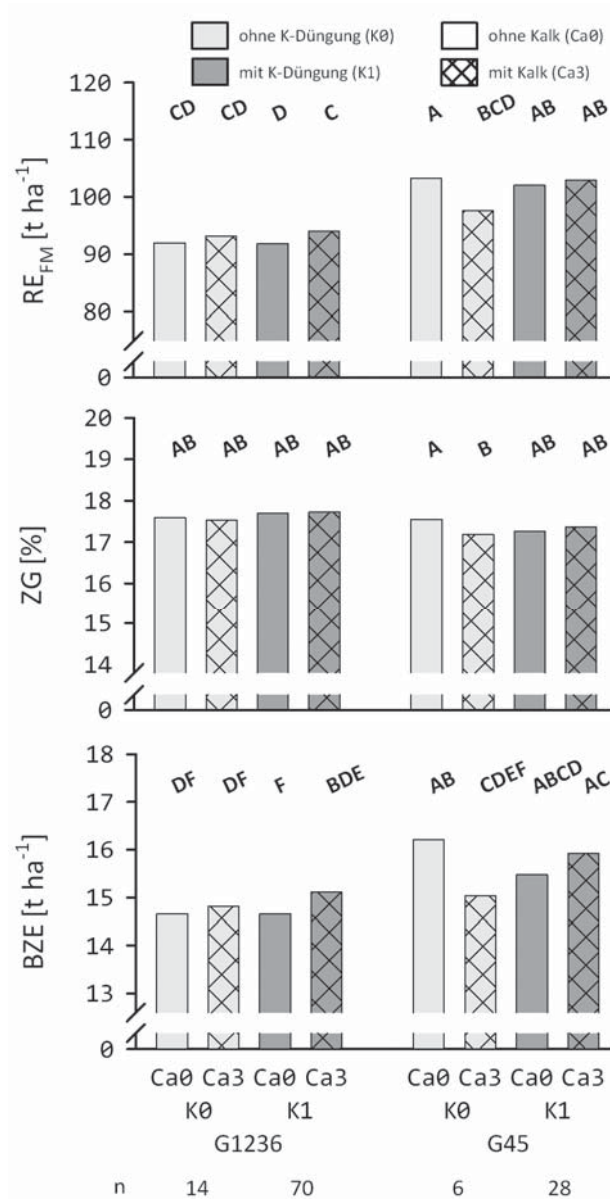


Abb. 2: Einfluss einer Kalkung mit 0 und 3 t CaO ha⁻¹ (Ca₀, Ca₃) sowie einer Kaliumdüngung mit 0 (K₀) und 200/400 kg K₂O ha⁻¹ (K₁) auf den Rüben-Frischmasseertrag (RE_{FM}), Zuckergehalt (ZG) und Bereinigten Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrüben in den Gruppen G1236 und G45. Die Ergebnisse resultieren in der Summe aus 118 Umwelten in Deutschland (2011, 2012). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant bei $p \leq 0.05$.

Mittels Hauptkomponentenschätzung, Cluster- und Diskriminanzanalyse konnten die Umwelten in zwei Gruppen (G1236, G45) unterteilt werden. Eine als Pufferkapazität interpretierte Hauptkomponente unterschied beide Gruppen, wobei G45 die Umwelten mit niedrigen und G1236 jene mit sehr niedrigen EUF-Ca-Gehalten charakterisierte (Tab. 1). Beide Gruppen waren aber aufgrund der Ca-Gehalte der 2. Fraktion unter 40 mg Ca (100 g Boden)⁻¹ als kalkbedürftig einzustufen (Németh et al. 1989). Mit dieser Gruppierung konnte gezeigt werden, dass die Kalkung der Umwelten in G1236 die Extrahierbarkeit von K verbesserte (Fischer et al. 2015b), wohingegen die Kalkung der Umwelten in G45 die Extrahierbarkeit nicht beeinflusste.

Die Pflanzenverfügbarkeit von K nach einer Kalkung wurde in 10 der genannten 62 Umwelten durch Vegetationsversuche mit Zuckerrüben überprüft. Es erfolgte

zusätzlich zur Kalkung (CaO: 0 und 3 t ha⁻¹) eine K-Düngung mit 0, 200 und 400 kg K₂O ha⁻¹, wobei die Varianten mit K-Düngung für die statistische Auswertung



Epilog

zusammengefasst (K1) und den Varianten ohne K-Düngung (K0) gegenübergestellt wurden. Die Versuchsanlage beinhaltete Düngungsvarianten, die neben der K-Düngung zusätzlich mit unterschiedlichen Mengen an Stickstoff und Magnesium versorgt und in der Auswertung jeweils als eigenständige Umwelt betrachtet wurden. In der Summe ergaben sich dabei 89 Umwelten in denen Kaliumgehalt und -entzug (Rübe und Blatt), sowie 118 Umwelten in denen Ertrag und Qualität der Zuckerrübe gemessen wurden.

Die K-Düngung und die höhere K-Versorgung im Boden der Umwelten in G45 (Tab. 1) führte zu einem höheren K-Entzug (Abb. 1), eine Wechselwirkung ergab sich allein für Variante Ca3/K0 in G45 mit einem geringeren K-Entzug der Rübe. Auch bei Rübenertrag, Zuckergehalt und Bereinigten Zuckerertrag in G45 trat die Wechselwirkung von Kalkung und K-Düngung auf (Abb. 2). Betrachtet man in G45 die beiden K0-Varianten, ist auffällig, dass sich der K-Gehalt der Rübe im Gegensatz deren K-Entzug nicht unterschied (Abb. 1). In G45 wurde nach Kalkung kein zusätzliches K aus dem Boden extrahiert (Fischer et al. 2015a), der K-Gehalt war zu Versuchsbeginn mit $16,8 \text{ mg K (100 g Boden)}^{-1}$ ausreichend hoch und lag höher als in G1236. Daraus kann geschlossen werden, dass der geringere K-Entzug der Zuckerrübe nach der Kalkung in der Variante ohne zusätzliche K-Düngung, durch eine geringe Pufferkapazität infolge Ionenantagonismus begründet sein könnte und so zu einem geringeren Rübenertrag und Zuckergehalt und damit Bereinigten Zuckerertrag führte.

Nur eine Kalkung mit zusätzlicher K-Düngung führte zu einem höheren Bereinigten Zuckerertrag. In der Gruppe der Umwelten mit niedriger Pufferkapazität (G1236) führten dagegen Kalkung und K-Düngung gleichermaßen zu einem höheren Bereinigten Zuckerertrag.

Schlussfolgerungen

Für die EUF-Beratung konnte klar gezeigt werden, dass Nährstoffwechselwirkungen zwischen K und Ca an Standorten mit unterschiedlicher Pufferkapazität zu unterschiedlichen K-Düngeempfehlungen führen müssen. Wegen der niedrigen Anzahl untersuchter Umwelten sind zur Präzisierung der Ergebnisse weitere Untersuchungen empfehlenswert. Da Nährstoffwechselwirkungen im komplexen System Boden/Pflanze in Versorgungsstufen unterhalb von C eine höhere Bedeutung zukommt, sollten insbesondere Standorte mit niedrigen und sehr niedrigen Versorgungsstufen einbezogen werden. Wie für eine Erhöhung der P-Effizienz (Lemme 2014), konnte in der vorliegenden Arbeit eine



Epilog

Erhöhung der K-Effizienz durch gezielte Düngung gezeigt werden. Beide Dissertationen im Rahmen des Verbundprojektes „Nährstoffwechselwirkungen im Boden“ sind somit ein Beitrag zur nachhaltigen Produktivitätssteigerung des Anbaus von Zuckerrüben.



Zusammenfassung

Nährstoffwechselwirkungen im Boden können nach einer Kalkung, infolge der Zufuhr von Calcium- (Ca-) Ionen und der Anhebung des pH-Wertes, auftreten. Davon sind insbesondere Böden betroffen, die trotz niedriger Ca-Gehalte neutrale pH-Werte aufweisen. Ziel dieser Arbeit war es einerseits, den Einfluss einer Kalkung kalkbedürftiger Lössböden mit pH-Werten nahe 7, auf die Extrahierbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor (P) und Kalium (K), sowie auf Ertrags- und Qualitätsparameter der Zuckerrübe zu prüfen. Andererseits sollten die Effekte einer Kalkung quantifiziert und einzelnen Standorten oder Standortgruppen zugeordnet werden, um einen Beitrag zur Verbesserung der Düngeberatung zu leisten.

Im Süden und der Mitte Deutschlands wurde anhand von 62 Feldversuchen auf ähnlichen Lössstandorten der Einfluss von Branntkalk auf die mittels Elektro-Ultrafiltration (EUF) aus dem Oberboden extrahierbaren Nährstoffe P und K geprüft. Dabei wurden die Nährstoffgehalte des Bodens im Verlauf von 24 Wochen nach der Kalkung mit 0, 3 und 12 t CaO ha⁻¹ (Kontrolle, Niedrig, Hoch) gemessen. Im Mittel über alle Standorte stiegen sowohl die EUF-P als auch die EUF-K-Gehalte infolge der Kalkung tendenziell an. Während die Summe beider EUF-P-Fractionen vier Wochen nach der Kalkung zunächst um etwa 0,4 mg P (100 g Boden)⁻¹ anstieg (Kalk-Niedrig), egalisierte sich dieser Effekt bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes. Für EUF-K zeigte sich bei niedriger Kalkgabe das gleiche Bild. Dagegen wurde bei hoher Kalkgabe auch 24 Wochen nach der Kalkung immer noch 1,2 mg (100 g Boden)⁻¹ mehr EUF-K extrahiert als in der unbehandelten Kontrolle. Während der gestiegene P-Gehalt vermutlich auf den Rückgang der sorbierten bzw. gefällten Eisen- und Aluminium-Phosphate infolge des gestiegenen pH-Wertes zurückgeht, kann angenommen werden, dass das zusätzlich gemessene EUF-K den Zwischenschichten der 2:1 Tonminerale entstammt, das durch die Zufuhr von Ca mobilisiert wurde.

Aufgrund der geringen Unterschiede im Mittel über alle Standorte, erfolgte in einem zweiten Schritt die Differenzierung der einzelnen Standorte, um die gefundenen Effekte zuzuordnen, vorhersagen und quantifizieren zu können. Als Basis dienten die Ergebnisse der Bodenuntersuchung an den Standorten vor Versuchsbeginn. Zunächst konzentrierte eine Hauptkomponentenschätzung die Information von 17 Parametern der Bodenuntersuchung. Anhand von vier extrahierten Hauptkomponenten, die als *Bodenschwere*, *organisches Potenzial*, *Pufferkapazität* und *K-Versorgung* interpretiert wurden, erfolgten eine Cluster-



Epilog

und schließlich eine Diskriminanzanalyse. Obwohl die Standorte durch multivariate Methoden in sechs Cluster differenziert werden konnten, ergab die nachfolgende Varianzanalyse nur geringe Unterschiede zwischen den Kalkvarianten innerhalb der Cluster. Erst nach der manuellen Gruppierung der Cluster in zwei Gruppen, aufgrund der Hauptkomponente *Pufferkapazität*, zeigte sich der Effekt einer Kalkung auf EUF-extrahierbares P und K. Dabei stieg infolge der Kalkung sowohl EUF-P als auch EUF-K in der Clustergruppe mit niedriger *Pufferkapazität* um 10 % bis 15 % an, wohingegen die Kalkung in der Clustergruppe mit hoher *Pufferkapazität* keinen Einfluss auf P und K ausübte.

Die Untersuchung des Einflusses einer Kalkung auf die Pflanzenverfügbarkeit von P und K, sowie auf Ertrags- und Qualitätsparameter der Zuckerrübe, erfolgte an 10 der 62 Standorte. Dabei wurde zusätzlich zur Kalkung eine K-Düngung in drei Stufen (0, 200 und 400 kg K₂O ha⁻¹) untersucht. Infolge der Kalkung sanken P- und K-Gehalt der Rübe marginal um 0,01 bzw. 0,07 g (kg TM)⁻¹ ab. Dagegen stiegen Rüben-Frischmasseertrag (RE_{FM}) und Bereinigter Zuckerertrag (BZE) um 1,4 bzw. 0,3 t ha⁻¹ an. Bei Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Kalkung und K-Düngung zeigte sich einzig am BZE, dass es nach einer Kalkgabe sinnvoll war, auch die benötigte K-Düngung durchzuführen. Unter Berücksichtigung der zuvor erarbeiteten Gruppierung mittels multivariater Statistik, zeigte sich, dass dieser Effekt den Standorten mit hoher *Pufferkapazität* zuzuordnen war und gleichfalls für RE_{FM}, Zuckergehalt und BZE gefunden wurde.

Im Hinblick auf eine Optimierung der Düngeempfehlung wurde ein Zusammenhang festgestellt, zwischen der Veränderung des EUF-P-Gehaltes infolge der Kalkung und dem EUF-Ca-Gehalt in der zweiten Fraktion. Obwohl das Steigungsmaß flach (-0,016) und das Bestimmtheitsmaß (0,17) niedrig war, zeigte die Auswertung die Möglichkeit die Düngeempfehlung für P auf Standorten mit niedriger *Pufferkapazität* zu reduzieren, sofern die empfohlene Kalkung durchgeführt wurde. Die Absicherung der Ergebnisse auf weiteren Standorten mit unterschiedlicher P- und K- Versorgung ist angezeigt.



VI. Literatur

- Anonymus (1982): Künftige individuelle Bezahlung. Deutsche Zuckerrübenzeitung 18, 3.
- Appel, T., Horn, C. (2010): Bodenfingerprints bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF) zur Optimierung der Düngeempfehlung. Abschlussbericht, Fachhochschule Bingen.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (2010): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin.
- Baraldi, G., Bertuzzi, S., Bovolenta, S., Campagna, G. (2006): First results of carbonatation lime application in alkaline soils. 69. IIRB Congress, Brüssel, pp. 319–328.
- Barrow, N. J. (1984): Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. Journal of Soil Science 35, 283–297.
- Beckett, P. H. T., Nafady, M. H. M. (1967): Potassium-calcium exchange equilibria in soils: The location of non-specific (Gapon) and specific exchange sites. Journal of Soil Science 18, 263–281.
- Behr, G. (1949): Über die chemischen und physikalischen Vorgänge bei der Lactet-Methode. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 47, 131–144.
- Beiß, U. (1979): Bewertung von Rüben mit Kopfanteil. Deutsche Zuckerrübenzeitung 15, 5.
- Beringer, H. (1985): Adequacy of soil testing for predicting fertilizer requirements. Plant and Soil 83, 21–37.
- BSA (2012): Beschreibende Sortenliste. Bundessortenamt, Hannover.
- Buchholz, K., Märländer, B., Puke, H., Glattkowski, H., Thieleke, K. (1995): Neubewertung des technischen Wertes von Zuckerrüben. Zuckerindustrie 120, 113–121.
- Burba, M., Georgi, B. (1975): Die fluorometrische Bestimmung der Aminosäuren in Zuckerrüben und Zuckerfabrikprodukten mit Fluoreszamin und o-Phthalaldehyd. Zuckerindustrie 25, 667–673.



Literatur

- Burba, M., Georgi, B. (1976): Die fluorometrische Bestimmung der Aminosäuren in Zuckerrüben und Zuckerfabrikprodukten mit Fluoreszamin und o-Phthalaldehyd. Zuckerindustrie 26, 322–329.
- Bürcky, K., Beiß, U., Winner, C., Draht, L., Schiweck, H. (1978): Versuche zur Bedeutung des Nährstoffangebotes für die Qualität der Zuckerrübe II. Stickstoff und Kalium. Zuckerindustrie 103, 190–200.
- Calinski, T., Harabasz, J. (1974): A dendrite method for cluster analysis. Communications in Statistics 3, 1–27.
- Christen, O., O'Halloran-Wietholtz, Z. (2002): Indikatoren für eine nachhaltige Landwirtschaft. Institut für Acker- und Pflanzenbau; Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg.
- Claassen, N., Jungk, A. (1982): Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden in Beziehung zur Kaliumaufnahme von Maispflanzen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 145, 513–525.
- DIN ISO 10693 (1997): Soil quality: Determination of carbonate content - Volumetric method. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 10694 (1996): Soil quality: Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). Beuth, Berlin.
- DIN ISO 11260 (1994): Soil quality: Determination of cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution. Beuth, Berlin.
- DIN ISO 11277 (1998): Soil quality: Determination of particle size distribution in mineral soil material: Method by sieving and sedimentation. Beuth, Berlin.
- Draycott, A. P., Christenson, D. R. (2003): Nutrients for Sugar Beet Production. CABI, Oxon.
- DüV (2006): Düngeverordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV).
- Ehrenberg, P. (1920): Das Kalk-Kali-Gesetz. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin.



- Eifert, J., Várnal, M., Szöke, L. (1985): EUF-nutrient contents required for optimal nutrition of grapes. *Plant and Soil* 83, 183–189.
- Finck, A. (1992): *Dünger und Düngung: Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- Fischer, S., Koch, H.-J., Bürcky, K. (2015a): Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Archives of Agronomy and Soil Science* 61, 725–736.
- Fischer, S., Koch, H.-J., Horn, D., Märländer, B. (2015b): Multivariate approach to predict the effect of liming on extractable phosphorus and potassium on loess soils with pH close to 7. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (eingereicht).
- Food and Agriculture Organization (2006): *World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication*. FAO, Rome.
- Food and Agriculture Organization (2014): *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. FAO, Rome.
- Foy, C. D., Chaney, R. L., White, M. C. (1978): The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology* 29, 511–566.
- Fürstenfeld, F. (1985): *Stickstoff- und Kaliumverfügbarkeit in norddeutschen Ackerböden bei Gülleanwendung - gemessen mittels Elektro-Ultrafiltration - und ihre Bedeutung für die Ernährung der Zuckerrübe*. Dissertation, Universität Gießen.
- Fürstenfeld, F., Hetterich, T., Horn, D. (2012): Die Bewertung von Stickstoff aus Zwischenfrüchten für die Zuckerrübe. 73. IIRB Congress, Brüssel, pp. 114–119.
- Fürstenfeld, F., Horn, D. (2010): Gezielte Düngung - ein Beitrag zur nachhaltigen Landwirtschaft. *Zuckerindustrie* 135, 570–571.
- Glattkowski, H., Märländer, B. (1995): Zur Frage der Beeinflußbarkeit von Ertrag und Qualität beim Anbau von Zuckerrüben durch pflanzenbauliche Maßnahmen - Teil 2: Errechnete Qualitäts- und Ertragsparameter. *Zuckerindustrie* 120, 668–674.



- Grass, K., Budig, M. (1976): Kalkwirkung in Ackerlandversuchen. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 33/I, 95–105.
- Grimme, H., von Braunschweig, L. C., Németh, K. (1973): Beziehungen zwischen Kalium, Calcium und Magnesium bei Aufnahme und Ertragsbildung. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 30/II, 93–100.
- Grimme, H., Németh, K. (1975): Einfluß einer Düngung auf den Diffusionsfluß nicht gedüngter Kationen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 138, 253–261.
- Günther, I. (1978): Stickstoffbedarfsermittlung für jedes einzelne Rübenfeld? Deutsche Zuckerrübenzeitung 14, 4+6.
- Günther, I. (1988): Möglichkeiten zur Berechnung von Stickstoffdüngempfehlungen zu Zuckerrüben anhand verschiedener Methoden, in: Kostensenkung und Umweltschutz, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 289-329.
- Haynes, R. J. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils. Plant and Soil 68, 289–308.
- Haynes, R. J. (1984): Lime and phosphate in the soil-plant system. Advances in Agronomy 37, 249–315.
- Haynes, R. J., Ludecke, T. E. (1981): Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legumes as affected by lime and phosphorus availability. Plant and Soil 62, 241–254.
- Haynes, R. J., Naidu, R. (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems 51, 123–137.
- Helyar, K. R., Munns, D. N., Burau, R. G. (1976): Adsorption of phosphate by gibbsite. I. Effects of neutral chloride salts of calcium, magnesium, sodium and potassium. Journal of Soil Science 27, 307–314.
- Heyn, J., Horst, H. (2004): Zur Nährstoffabfuhr durch Zuckerrüben. VDLUFA-Schriftenreihe 59, Saarbrücken, 383-390.



- Hinsinger, P. H., Jaillard, B. (1993): Root-induced release of interlayer potassium and vermiculization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. *Journal of Soil Science* 44, 525–534.
- Hoffmann, C. (2006): Zuckerrüben als Rohstoff. Habilitationsschrift, Universität Göttingen.
- Hoffmann, C. M., Huijbregts, T., van Swaaij, N., Jansen, R. (2009): Impact of different environments in Europe on yield and quality of sugar beet genotypes. *European Journal of Agronomy* 30, 17–26.
- Horn, C., Appel, T., Steffens, D. (2009): Neue Gerätetechnik bei der Elektro-Ultrafiltration (EUF) hilft bei der Prognose der Phosphatverfügbarkeit auf kalkhaltigen Böden. *VdLUFA Kongress, Karlsruhe*, pp. 474–482.
- Horn, D. (1990): Die Erstellung eines Stickstoffdüngungsmodells für Mais auf Basis von Feldversuchen und der Elektro-Ultrafiltrationsmethode. Dissertation, Universität Gießen.
- Horn, D. (2006): Determination of micronutrients and heavy metals in soils using electro-ultrafiltration (EUF) technique by addition of DTPA. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 83–86.
- Horn, D. (2011): Persönliche Mitteilung.
- Horn, D. (2015): Persönliche Mitteilung.
- ICUMSA (1994): Methods book. Method GS6-3: The determination of the polarisation of sugar beet by the macerator or cold aqueous digestion method using aluminium sulphate as clarifying agent - official. In: *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*. Bartens, Berlin.
- Irion, H. (1976): Stickstoffbilanz - Düngung nach Maß. *Deutsche Zuckerrübenzeitung* 12, 11.
- Irion, H. (1988): EUF-Bodenuntersuchungen - aus ökonomischen und ökologischen Gründen heute notwendiger denn je! Die EUF-Düngeberatung in der Bundesrepublik Deutschland, in: *Kostensenkung und Umweltschutz*, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 330-359.



- Izdebski, Z. (2015): Persönliche Mitteilung.
- Jackson, B. L. J., During, C. (1979): Studies of slowly available potassium in soils of New Zealand I. Effects of leaching, temperature and potassium depletion on the equilibrium concentration of potassium in solution. *Plant and Soil* 51, 197–204.
- Jaskulska, I., Jaskulski, D., Kobierski, M. (2014): Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment. *Plant, Soil and Environment* 60, 146–150.
- Kaiser, H. F. (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200.
- Kaiser, H. F. (1959): Computer program for varimax rotation in factor analysis. *Educational and Psychological Measurement* 19, 413–420.
- Kaiser, H. F. (1960): The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement* 20, 141–151.
- Kaiser, H. F. (1970): A second generation little jiffy. *Psychometrika* 35, 401–415.
- Kaiser, H. F., Rice, J. (1974): Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement* 34, 111–117.
- Kempl, F. (2015): Persönliche Mitteilung.
- Köhler, R. (1997): Düngeberatung der nachgelagerten Industrie. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Würzburg, pp. 97–111.
- Kong, T., Steffens, D. (1989): Bedeutung der Kalium-Verarmung in der Rhizosphäre und er Tonminerale für die Freisetzung von nichtaustauschbarem Kalium und dessen Bestimmung mit HCl. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 152, 337–343.
- Kreutzer, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169, 447–470.
- Kuchenbuch, R. O., Jungk, A. (1984): Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 147, 435–448.



- Kurpjuweit, H. (2013): Auf Phosphor und Kali achten. BWagrar 5, 17–18.
- Laudicina, V. A., Hurtado, M. D., Badalucco, L., Delgado, A., Palazzolo, E., Panno, M. (2009): Soil chemical and biochemical properties of a salt-marsh alluvial Spanish area after long term reclamation. *Biology and Fertility of Soils* 45, 691–700.
- Lemme, H. (2014): Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares und pflanzenverfügbares Phosphat sowie Phosphatfraktionen des Bodens. Dissertation, Universität Göttingen.
- Lemme, H., Koch, H.-J., Horn, D., Märländer, B. (2014): Einfluss einer Kalkung auf EUF extrahierbares und pflanzenverfügbares Phosphor und Kalium in Gefäßversuchen mit Zuckerrüben. *Sugar Industry/Zuckerindustrie* 139, 48–57.
- Liebig, J. von (1840): Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie. Friedrich Vieweg und Sohn Publ. Co., Braunschweig.
- Littell, R. C. M., Milliken, G. A., Stroup, W. W., Wolfinger, R. D. (1996): SAS systems for mixed models. Cary, New York.
- Machold, O. (1963): Über die Bindungsformen des “labilen” Phosphats im Boden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 103, 132–138.
- MacIntire, W. H. (1919): The carbonation of burnt lime in soils. *Soil Science* 7, 325–453.
- Maier, J. (1988): Optimierung der Stickstoffdüngung im Stärkekartoffelanbau Süddeutschlands mit EUF, in: Kostensenkung und Umweltschutz, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 224-254.
- Märländer, B., Hoffmann, C., Koch, H.-J., Ladewig, E., Merkes, R., Peterson, J., Stockfisch, N. (2003): Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in Germany: Heading for sustainable development. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189, 201–226.
- Mengel, K. (1984): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Fischer, Stuttgart.
- Mengel, K. (1988): Wissenschaftliche Grundlagen der EUF-Kalium- und Kalzium-Untersuchung und der entsprechenden Empfehlungen, in: Kostensenkung und Umweltschutz, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 404-424.



- Mengel, K., Kirkby, E. A. (2001): Principles of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Mengel, K., Rahmatullah, X., Dou, H. (1998): Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Science* 163, 805–813.
- Mengel, K., Uhlenbecker, K. (1993): Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. *Soil Science Society of America Journal* 57, 761–766.
- Milford, G. F. J., Armstrong, M. J., Jarvis, P. J., Houghton, B. J., Bellett-Trevers, D. M., Jones, J., Leigh, R. A. (2000): Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status. *Journal of Agricultural Science* 135, 1–10.
- Milligan, G. W., Cooper, M. C. (1985): An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika* 50, 159–179.
- Molitor, H., Münchhoff, K., Pesch, J., Pollehn, J., Rex, M., Rubenschuh, H., Scherer, H. W., Setzer, F., von Wulffen, U. (2012): Hinweise zur Kalkdüngung. DLG-Merkblatt 353, 1–73.
- Moore, J.-D., Quimet, R. (2010): Effect of two Ca fertilizer types on sugar maple vitality. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 1985–1992.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31–36.
- Naidu, R., Syers, J. K., Tillman, R. W., Kirkman, J. H. (1990): Effect of liming on phosphate sorption by acid soils. *Journal of Soil Science* 41, 165–175.
- Németh, K. (1972): Bodenuntersuchung mittels Elektro-Ultrafiltration (EUF) mit mehrfach variiertes Spannung. *Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft* 27, 184–196.
- Németh, K. (1976): Die effektive und potentielle Nährstoffverfügbarkeit im Boden und ihre Bestimmung mit Elektro-Ultrafiltration (EUF). Habilitationsschrift, Universität Gießen.
- Németh, K. (1979): The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). *Advances in Agronomy* 31, 155–188.



- Németh, K. (1982): Electro-ultrafiltration of aqueous soil suspension with simultaneously varying temperature and voltage. *Plant and Soil* 64, 7–23.
- Németh, K. (1985): Recent advances in EUF research (1980-1983). *Plant and Soil* 83, 1–19.
- Németh, K., Bartels, H., Heuer, C., Ziegler, K. (1989): Kalkbedarf mittels EUF sicher und genau beurteilen. *Zuckerindustrie* 114, 336–338.
- Németh, K., Ziegler, K. (1988): Beziehungen zwischen den EUF-KFraktionen und den nach herkömmlichen Methoden gewonnenen K-Mengen und ihre Bedeutung für die Beurteilung der K-Versorgung des Bodens, in: *Kostensenkung und Umweltschutz*, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 71-91.
- Orlovius, K. (1988): Optimale K-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von Standortfaktoren, dargestellt an Hand langjähriger Feldversuche, in: *Kostensenkung und Umweltschutz*, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 609-629.
- Pauler, B., Neumann, K.-H. (1999): Methodische Untersuchungen zum Extraktionsverhalten der Elektro-Ultrafiltration unter kontinuierlicher Registrierung der elektrischen Betriebsfaktoren. <<http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/1999/128/>>. [10 February 2012].
- Piepho, H. P., Büchse, A., Richter, C. (2004): A mixed modelling approach for randomized experiments with repeated measures. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190, 230–247.
- Ploeg, R. R. van der, Böhm, W., Kirkham, M. B. (1999): History of soil science. *Soil Science Society of America Journal* 63, 1055–1062.
- Reinefeld, E., Emmerich, A., Baumgarten, G., Winner, C., Beiß, U. (1974): Zur Vorhersage des Melassezuckers aus Rübenanalysen. *Zucker* 27, 2–15.
- Reineke, H., Stockfisch, N., Märländer, B. (2013): Analysing the energy balances of sugar beet cultivation in commercial farms in Germany. *European Journal of Agronomy* 45, 27–38.



- Rex, M., Munk, H. (1988): Die Eichung der EUF-Methode an ein- und mehrjährigen Feldversuchen hinsichtlich der Phosphatdüngung, in: Kostensenkung und Umweltschutz, 3. Intern. EUF-Symposium. Süddeutsche Zucker-AG, Mannheim, 600-608.
- Rich, C. I. (1964): Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil. *Soil Science* 98, 100–106.
- Rich, C. I., Black, W. R. (1964): Potassium exchange as affected by cation size, pH, and mineral structure. *Soil Science* 97, 384–390.
- Römheld, V., Kirkby, E. A. (2010): Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil* 335, 155–180.
- Sarle, W. S. (1983): SAS Technical Report A-108, Cubic Cluster Criterion. SAS Technical Report A-108 Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SAS Institute Inc. (2011): SAS/STAT® 9.3 User's Guide Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sawhney, B. L. (1972): Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays and Clay Minerals* 20, 93–100.
- Schachtschabel, P., Heinemann, G. (1964): Beziehungen zwischen P-Bindungsart und pH-Wert bei Lössböden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 105, 1–13.
- Scheffer, B., Scheffer, K. (1984): Der Einfluß von Kalk und Kieselsäure auf die Phosphatmobilität (CAL) in Böden. *Landwirtschaftliche Forschung* 37, 1–8.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke, Stuttgart.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum, Berlin.
- Scheffer, K., Schreiber, A., Kickuth, R. (1980): Die sorptive Bindung von Düngephosphaten im Boden und die phosphatmobilisierende Wirkung der Kieselsäure - Übersichtsbeitrag - 1. Mitteilung: Die sorptive Bindung von Phosphat im Boden. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 24, 799–814.
- Scheib, A. J., Birke, M., Dinelli, E., GEMAS Project Team (2014): Geochemical evidence of aeolian deposits in European soils. *Boreas* 43, 175–192.



- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer, Stuttgart.
- Schüller, H. (1969): Die CAL- Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 123, 48–63.
- Schwertmann, U., Deller, B., Niederbudde, E. A. (1976): Langzeitwirkung einer Kalkung auf den Nährstoffzustand und die Basensättigung einer Braunerde aus Granitschutt. Landwirtschaftliche Forschung 29, 275–288.
- Seggewiss, B., Jungk, A. (1988): Einfluss der Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden auf die Magnesiumaufnahme von Pflanzen. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 151, 91–96.
- Sena, M. M., Frighetto, R. T. S., Valarini, P. J., Tokeshi, H., Poppi, R. J. (2002): Discrimination of management effects on soil parameters by using principle component analysis: a multivariate analysis case study. Soil and Tillage Research 67, 171–181.
- Shukla, M. ., Lal, R., Ebinger, M. (2004): Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern ohio. Soil Science 169, 133–142.
- Sparks, D. L. (1987): Potassium dynamics in soils. Advances in Soil Science 6, 1–63.
- Sprengel, C. (1828): Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes. Journal für Technische und Ökonomische Chemie 2:423-474, 3:42-99, 313-352, 397-421.
- Statistisches Bundesamt (2014): Statistisches Jahrbuch - Deutschland und Internationales.
- Steffens, D. (1994): Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. Soil Science Society of America Journal 58, 1702–1708.
- Syers, J. K. (2003): Potassium in soils: Current concepts. In: Johnston A.E. (ed.) Proceedings of the IPI golden jubilee congress 1952-2002 held at Basel Switzerland 8-10 Oct 2002. Feed the soil to feed the people. The role of potash in sustainable agriculture. International Potash Institute, Basel 301–310.
- Truog, E. (1948): Lime in relation to availability of plant nutrients. Soil Science 65, 1–8.



- Várnai, M., Eifert, J., Szöke, L. (1985): Effect of liming on EUF-nutrient fractions in the soil, on nutrient contents of grape leaves and on grape yield. *Plant and Soil* 83, 55–63.
- VDLUFA (1991): Bestimmung des pH-Wertes, A 5.1.1. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, in VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (1997): Standpunkt Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Hrsg: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt.
- VDLUFA (2000): Standpunkt Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Hrsg: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt.
- VDLUFA (2002a): Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat–Lactat–Auszug, A 6.2.1.1; in VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (2002b): Bestimmung der durch Elektro-Ultrafiltration löslichen Anteile von Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Natrium, Schwefel und Bor, A 6.4.2; in VDLUFA Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Wang, J. G., Zhang, F. S., Cao, Y. P., Zhang, X. L. (2000): Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, 37–44.
- Ward, J. H. jr. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function. *American Statistical Association Journal* 58, 236–244.
- Wasner, J., Liebhard, P., Eigner, H. (2001): Ausbringung von Carbokalk auf Ackerböden mit hohem pH-Wert im pannonischen Anbaugebiet Österreichs. *Zuckerindustrie* 126, 194–201.
- Wehrmann, J., Scharpf, H. C. (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffbedarf (Nmin-Methode). *Plant and Soil* 52, 109–126.
- Wendland, M., Diepolder, M., Capriel, P. (2012): Leitfaden zur Düngung von Acker- und Grünland. Kastner, Wolnzach.



- White, R. E., Taylor, A. W. (1977): Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate. *Journal of Soil Science* 28, 48–61.
- Wiedemann, H. (1978): Individuelle Bezahlung - neues Kapitel in Südzucker-Geschichte. *Deutsche Zuckerrübenzeitung* 14, 18.
- Wiedemann, H. (1982): Südzucker richtet Bodenlabor ein. *Deutsche Zuckerrübenzeitung* 18, 4.
- Wiklicky, L. (1982): Application of the EUF procedure in sugar beet cultivation. *Plant and Soil* 64, 115–127.
- Wiklicky, L., Németh, K. (1981): Düngungsoptimierung mittels EUF-Bodenuntersuchung bei der Zuckerrübe. *Zuckerindustrie* 106, 982–988.
- Wiklicky, L., Németh, K. (1982): Die anzustrebenden EUF-P-Gehalte im Zuckerrübenanbau. *Zuckerindustrie* 107, 607–611.
- Wong, M. A., Lane, T. (1983): A kth nearest neighbour clustering procedure. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B* 45, 362–368.
- Yan, F. (1992): Erstellung eines Kalkdüngungsmodells für Gerste mittels Elektro-Ultrafiltrationsmethode sowie die Bedeutung des Calciums für Pflanzenwachstum auf sauren Böden. Dissertation, Universität Gießen.
- York, E. T., Bradfield, R., Peech, M. (1953): Calcium-potassium interactions in soils and plants: I. Lime-induced potassium fixation in mardin silt loam. *Soil Science* 379–387.
- Zhang, X. C., Norton, L. D. (2002): Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *Journal of Hydrology* 260, 194–205.
- Ziegler, K. (1989): Feldversuche zur Ermittlung der Stickstoffverfügbarkeit fränkischer Ackerböden zur weiteren Eichung des EUF-Verfahrens im Getreidebau. Dissertation, Universität Gießen.

VII. Anhang

Anhang 1: Signifikanz (F-Test) der Effekte einer Kalkung, einer Kaliumdüngung und einer Standortgruppierung sowie deren Wechselwirkung auf den Nährstoffgehalt und -entzug sowie Ertrag und Qualität von Zuckerrüben im Mittel von maximal 118 Umwelten im Süden und der Mitte Deutschlands. ns = nicht signifikant; *, **, *** = signifikant bei $p \leq 0,05, 0,01, 0,001$ (ANOVA F-Test).

Parameter	Kalk- Düngung (CaO)	Standort- Gruppe (G)	Kali- Düngung (K ₂ O)	CaO x G	CaO x K ₂ O	K ₂ O x G	CaO x K ₂ O x G
P-Gehalt Blatt	**	***	ns	*	*	ns	ns
P-Gehalt Rübe	***	ns	ns	***	**	ns	***
K-Gehalt Blatt	ns	ns	*	**	**	ns	ns
K-Gehalt Rübe	**	ns	*	ns	ns	ns	*
P-Entzug Blatt	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
P-Entzug Rübe	***	ns	ns	***	***	ns	***
K-Entzug Blatt	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
K-Entzug Rübe	**	***	***	***	***	ns	**
P-Entzug gesamt	**	ns	ns	**	**	ns	**
K-Entzug gesamt	ns	*	***	ns	ns	ns	ns
Rüben-Frischmasseertrag	ns	***	ns	***	***	ns	*
Blatt-Trockenmasseertrag	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Kaliumgehalt Brei	***	ns	***	*	***	ns	***
Natriumgehalt Brei	*	ns	ns	ns	**	ns	*
α-Amino-N-Gehalt Brei	ns	***	ns	ns	*	ns	**
Zuckergehalt	*	ns	ns	ns	***	ns	**
Bereinigter Zuckerertrag	ns	***	ns	**	***	ns	**



Anhang

Anhang 2: Anzahl der Standorte (S) und Umwelten (U) in den Gruppen G1236 und G45 insgesamt sowie für die Pflanzenanalyse und aufgeteilt in Umwelten ohne (K0) und mit (K1) Kaliumdüngung

	G1236	G45	Summe
S gesamt	7	3	10
S 2011	3	2	5
S 2012	4	1	5
U insgesamt	84	34	118
U in K0	14	6	20
U in K1	70	28	98
U Pflanzenanalyse gesamt	63	26	89
U Pflanzenanalyse K0	14	6	20
U Pflanzenanalyse K1	49	20	69



Danksagung

Herrn Prof. Dr. Bernward Märländer danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Referats und für die Möglichkeit das Thema am Institut für Zuckerrübenforschung als externer Doktorand bearbeiten zu können. Für die bereitwillige Übernahme des Korreferats danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. Klaus Dittert, sowie Herrn Prof. Dr. Andreas Gransee für die Drittprüferschaft.

In besonderer Weise möchte ich mich bei Herrn Dr. Fred Fürstenfeld bedanken, der das Projekt von Anfang an unterstützte, förderte und mich zu gegebener Zeit auch mahnte und scheuchte. Für die exzellente wissenschaftliche Betreuung, für zahlreiche Ratschläge und gute Tipps bedanke ich mich von Herzen bei den Herren Dr. Heinz-Josef Koch und Dr. Klaus Bürcky sowie bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und der EUF-Arbeitsgemeinschaft.

Ein großer Dank gilt meinen Kollegen Dr. Dietmar Horn, Thomas Hetterich, Rosi Michel, Renate Dürr und Karin Gabriel, die mich während der gesamten Zeit nicht nur unterstützten, sondern mir immer auch den Rücken frei hielten.

Für die Unterstützung bei Planung und Durchführung der Feldversuche sowie der nachfolgenden Untersuchungen bedanke ich mich beim gesamten Team des Instituts für Zuckerrübenforschung, bei den Arbeitsgemeinschaften für Versuchswesen und Beratung im süddeutschen Zuckerrübenanbau, bei den Kollegen der Südzucker AG, bei den beteiligten Landwirten sowie den zahllosen Praktikanten und Helfern.

Für die Finanzierung des Projekts bedanke ich mich bei der K+S KALI GmbH, der Südzucker AG und der Bodengesundheitsdienst GmbH.

Die Verwendung der Artikel in der vorliegenden Arbeit erfolgte mit Erlaubnis der Verlage: Taylor & Francis, Wiley-Blackwell sowie Dr. Albert Bartens KG. Vielen Dank dafür.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Göttinger Condoktoranden und insbesondere Dr. Holger Lemme für die freundliche Aufnahme sowie die fachliche, menschliche und organisatorische Unterstützung während meiner Aufenthalte in Göttingen.

Das größte Dankeschön möchte ich aber an meine liebe Katja, unsere Familien und Freunde richten, die in schwierigen und leichten Zeiten da sind, mich mit Rat und Tat sowie mit Liebe und Torten unterstützen, und die einfach wunderbar sind!



Lebenslauf

Sven Fischer

geboren am 15. Juli 1975 in Hanau am Main

Schulische Bildung

1982 – 1986	Grundschule, Hainburg
1986 – 1992	Realschule, Hainburg
1992 – 1994	Fachoberschule, Offenbach

Zivildienst

1994 – 1995	Altenpflegeheim, Hainburg
-------------	---------------------------

Akademische Bildung

1996 – 2001	Fachhochschule Weihenstephan, Abteilung Triesdorf Schwerpunkt: Pflanzliche Erzeugung Diplom-Ingenieur (FH)
2002 – 2004	University College Dublin, Irland Masterstudium: Plant Protection Master of Science (Agriculture)
2010 – 2015	Georg-August-Universität Göttingen Promotionsstudiengang Agrarwissenschaften

Berufliche Tätigkeit

2001 – 2002	Ingenieurbüro A. Hetterich, Schwarzach Feldversuchswesen
2004	Field-Research-Support, Wunstorf Feldversuchswesen
seit 2005	BGD-Bodengesundheitsdienst GmbH, Ochsenfurt Düngeberatung





