

**Tagungsbeitrag zu:**

Jahrestagung der DBG, Kommission I

**Titel der Tagung:**

Erd-Reich und Boden-Landschaften

**Veranstalter:**

DBG/BGS

**Termin und Ort der Tagung:**

24. – 29. August 2019, Bern

Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation); <http://www.dbges.de>

## **Optimierung der Struktur landwirtschaftlicher Böden mittels Kalkung zur Minderung von Stickstoffdüngungsverlusten**

Tina Frank<sup>1</sup>, Iris Zimmermann<sup>1</sup>, Rainer Horn<sup>1</sup>

### **Zusammenfassung**

Die Kalkung von landwirtschaftlich genutzten Böden ist eine weltweit gängige Praxis um den pH-Wert von versauerten Böden anzuheben und somit die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern. Im Zusammenhang mit dem Nährstoffkreislauf von Stickstoff (N) ist die Rolle einer in Folge einer Kalkung verbesserten Bodenstruktur hingegen nur wenig erforscht. Ein Ansatz für die effizientere Aufnahme von N durch Kulturpflanzen ist die Etablierung einer bodenartspezifisch optimalen Bodenstruktur, für deren Stabilisierung neben der organischen Bodensubstanz vor allem auch der Kalkzustand des Bodens ein entscheidender Parameter ist.

Unsere Hypothese ist, dass eine Verbesserung der Bodenstruktur zu einer Verringerung von N-Austrägen aus landwirtschaftlichen Produktionssystemen führt. Daher steht die Wirkung einer einmaligen Kalkapplikation auf die Bodenstruktur in einem Zeitraum von zunächst 36 Monaten im Mittelpunkt der Untersuchungen. Dazu werden wichtige physikalische und mechanische Kenngrößen wie die Porengrößenverteilung und die daraus resultierenden Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes, die hydraulische Leitfähigkeit, Scherparameter und Vorbelastungswerte im Oberboden von zwei ackerbaulich genutzten Marschböden in Schleswig-Holstein ermittelt. Die beiden Feldversuche wurden im Herbst 2016 in einem randomisierten Blockdesign angelegt und mit zwei verschiedenen Kalkstufen (kohlenaurer Kalk =  $\text{CaCO}_3$ ) nach Empfehlung der VDLUFA (2000) behandelt. Zusätzlich wird jedes Jahr N in drei verschiedenen Mengen in Form von Harnstoff oder KAS ausgebracht, auch hier nach Empfehlung der VDLUFA (2010). Die Ergebnisse der physikalischen Bodenparameter zeigen bereits in den ersten sechs Monaten nach Etablierung der Feldversuche Veränderungen in der Porenverteilung und Porenfunktion. Die mechanischen Parameter zeigen, dass gekalkte ackerbaulich genutzte Böden Zeit benötigen, um eine nachhaltig verbesserte Struktur zu entwickeln.

---

<sup>1</sup> Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Hermann-Rodewald-Straße 2, 24118 Kiel

**Schlüsselwörter:** Kalk, Bodenstruktur, Porenverteilung und Porenfunktion, mechanische Parameter

## **Einleitung**

Die schweren und lehmigen Böden in Schleswig-Holstein, wie sie insbesondere im östlichen Hügelland und in den Marschen zu finden sind, dienen als wichtige Ackerstandorte. Durch natürliche und anthropogene Ursachen unterliegen diese Böden einer kontinuierlichen Versauerung. Laut Bodenzustandsbericht des Thünen-Instituts (veröffentlicht Dezember 2018) weisen bereits 42 % der mineralischen Böden unter Ackernutzung einen zu geringen pH-Wert auf (Jacobs et al., 2018). Auch die schweren und mittleren Böden in Schleswig-Holstein liegen zu 1/3 in der Versorgungsstufe A und B und sind damit unterversorgt (Lausen, 2012). Hinzu kommt, dass die Ausnutzung des Produktionsfaktors N immer noch sehr gering ist. Diese wird in der Nitrogen Use Efficiency (NUE) ausgedrückt und beträgt für Getreide derzeit 29-42 % (Raun und Johnson, 1999). Aus diesen Hintergründen ergab sich die Zielsetzung landwirtschaftliche Flächen zu kalken und die derzeitigen Kalkempfehlungen der VDLUFA (2000) zu optimieren. Die aktuellen Bestimmungen zum Kalkbedarf auf Acker – und Grünlandstandorten basieren auf den Bodenhintergrundwerten pH-Wert, Textur und Humusgehalt. Eine durch die Kalkung herbeigeführte Verbesserung der Bodenstrukturstabilität wird momentan nicht ausreichend berücksichtigt. Haynes

und Naidu (1998) zeigten, dass eine Kalkung eine Strukturbildung und Stabilisierung durch die Ausbildung von Calciumbrücken zwischen den Oberflächen von Tonmineralen und Partikeln der organischen Substanz mit sich bringt. Dispergierte Tonpartikel liegen in einer plättchenähnlichen dichten Struktur vor und Böden mit hohem Tongehalten weisen daher in der Regel einen hohen Anteil an Feinporen auf. Diese Eigenschaften können negative Folgen für die Ackernutzung haben, wenn das im Boden gebundene Wasser nicht pflanzenverfügbar ist und die Böden durch die geringe Wasserleitfähigkeit erosionsgefährdet sind. Durch eine Kalkung wird die Flockung und Aggregation von Tonpartikeln möglich, wobei sich eine lockere Kartenhausstruktur ausbildet. Daraus resultiert eine Umstrukturierung des Porenraums und eine Verschiebung der Porengrößenverteilung in Richtung gröberer Poren, wobei es zu einer Verbesserung der Infiltration, Speicherung von und Versorgung mit Wasser kommt. Auch wird das Erosionspotential durch die Verschiebung zu gröberen Poren herabgesenkt (Cuisinier et al., 2011). Zusätzlich wird durch die Kalkung eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffaufnahme durch die Kulturpflanzen herbeigeführt. Insbesondere soll gezeigt werden, dass eine Optimierung der Bodenstruktur die N-Nutzungseffizienz verbessert und somit die übermäßige Belastung mit N aus landwirtschaftlichen Systeme-

men reduziert werden kann. Es wird zusätzlich erwartet, dass sich diese Verbesserungen auch in der Produktivität und den Erträgen widerspiegeln.

### **Material und Methoden**

Es wurden zwei Feldversuche im Bereich der alten Marschen an der Westküste von Schleswig-Holstein in einem randomisierten Blockversuch in vierfacher Wiederholung etabliert. Der Versuchszeitraum beträgt insgesamt 36 Monate (Herbst 2016 – Herbst 2019).

Der Standort Struckum befindet sich im Kreis Nordfriesland und der Boden ist als Kleimarsch charakterisiert. Diese Marschen gelten als tonreich und sind bereits entkalkt. Der Oberboden wurde als stark toniger Schluff mit einem Tongehalt von 28 % und einem Humusgehalt von 0,9 % beschrieben. Der Start-pH liegt bei 5,0. Der Ziel-pH liegt zwischen 6,4 und 7,2 (VDLUFA, 2000). Der Kalkbedarf liegt für die Variante Kalk 1 bei 120 dt CaO ha<sup>-1</sup> und bei der Variante Kalk 1,5 bei 160 dt CaO ha<sup>-1</sup>. Hierbei ist zu beachten, dass die erlaubte Höchstmenge bei einer Einmalkalkung in Schleswig-Holstein bei 80 dt CaO ha<sup>-1</sup> liegt. Als Kompromiss wurde die ausgebrachte Menge an Kalk angepasst und es wurden für Kalk 1 80 dt CaO ha<sup>-1</sup> und für Kalk 1,5 120 dt CaO ha<sup>-1</sup> ausgebracht. Der Standort Barlt liegt etwa 80 km südlich vom ersten Standort im Kreis Dithmarschen. Es handelt sich auch hier um eine Kleimarsch, die über einem Niedermoor liegt. Im Oberboden findet sich ein mittel schluffiger Ton mit einem Tongehalt von

40 %, welcher stark humos ist (Humusgehalt 5,6 %). Der Start-pH liegt bei 5,9. Der Ziel-pH liegt zwischen 5,9-6,7 (VDLUFA, 2000). Für die Kalkapplikation ergaben sich für die Variante Kalk 1 36 dt CaO ha<sup>-1</sup> und für die Variante Kalk 1,5 54 dt CaO ha<sup>-1</sup>. Diese Kalkmengen konnten auf dem Standort Barlt auch appliziert werden, da sie unter der jährlichen Höchstmenge liegen.

Zur Überprüfung der Kalkwirkung auf den Standorten wurde eine jährliche Beprobung des Bodens durchgeführt. Hierbei wurde gestörtes und ungestörtes Bodenmaterial aus dem Ap-Horizont entnommen. An dem gestörtem Bodenmaterial wurden chemische Analysen durchgeführt u.a. die Bestimmung des pH Wertes, gemessen in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung (Verhältnis Boden:Lösung 1:2,5) nach DIN ISO 11260 (2018). Ungestörtes Material wurde in Form von Stechzylindern entnommen um folgende Messungen durchzuführen:

- Die Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) wurde nach Hartge (1993) unter instationären Strömungsbedingungen mittels Haubenpermeameter bestimmt.
- Die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushaltes: Luftkapazität (LK) und (nutzbare) Feldkapazität (nFK) wurden aus der Porengrößenverteilung abgeleitet. Diese wurde über die schrittweise Entwässerung (-60 hPa, -300 hPa, -500 hPa) von Stechzylinderproben mittels Unterdruck bestimmt) (Blume et al., 2011). Zur Bestimmung des Wassergehaltes bei -15000 hPa wurde die

Überdruckmethode verwendet (Hartge und Horn, 2009).

- Die Scherparameter wurden an auf -60 hPa vorentwässerten Proben mit Hilfe eines Kastenschergerätes ermittelt. Für die Ermittlung der Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden wurde der maximale Scherwiderstand bei definierten Auflasten (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) bestimmt und gegen die Normalspannung aufgetragen. Anschließend wurden aus dem Schnittpunkt der Bruchgeraden mit der Ordinate die Kohäsion  $c$  und aus der Steigung der Geraden der Winkel der inneren Reibung  $\varphi$  abgeleitet (Kézdi und Rétháti, 1988).
- Die Aggregatstabilität (Tensile Strength (Y) nach Dexter und Kroesbergen (1985)) wurde im uniaxialen Scherverversuch (= Crushing Test) an Einzelaggregaten (< 16 mm) des Standortes Barlt ermittelt; welche zunächst luftgetrocknet und anschließend im Zweisäulenprüfsystem (Serie 5569 der Firma INSTRON) zerdrückt wurden. Während der Messung wird eine Kraft senkrecht von oben auf das Aggregat ausgeübt und verursacht im Inneren des Aggregates eine Zugspannung (Tensile Strength, Y). Während der Kraftausübung, steigt auch Y an, bis das Aggregat zerbricht. Je höher die maximale Y, desto stabiler ist das Aggregat.

## Ergebnisse

Eine steigende Kalkzugabe erhöht an beiden Standorten den pH-Wert im Vergleich

zur Kalk 0 Variante (Tab.1). In Struckum erreichte die Kalk 1 Variante nicht den geforderten Ziel-pH-Wert. Ebenso die Kalk 1,5 Variante (welches der empfohlenen Ausbringungsmenge entspricht) im Jahr 2017. In Barlt wurde der Ziel-pH-Wert von 5,9-6,7 auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Varianten erreicht.

Tab.1 pH-Werte (gemessen in  $\text{CaCl}_2$ ) für die Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 des Oberbodens in den Jahren 2017-2018 an den Standorten Struckum und Barlt

pH (gemessen in $\text{CaCl}_2$ )	Struckum			Barlt		
	Kalk 0	Kalk 1	Kalk 1,5	Kalk 0	Kalk 1	Kalk 1,5
2017	4,70	5,54	6,30	5,92	6,22	6,28
2018	5,30	5,97	6,66	5,91	6,23	6,46
2019	5,35	6,19	6,43	5,84	6,00	6,37

Mit der Kalkzugabe steigt die gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) im Vergleich zur Kalk 0 Variante an. Für das Jahr 2019 steigt die  $k_f$  in Struckum von mittel (Kalk 0: 34  $\text{cm d}^{-1}$ ) auf hoch (Kalk 1: 90  $\text{cm d}^{-1}$ ) bis sehr hoch (Kalk 1,5: 102  $\text{cm d}^{-1}$ ). In Barlt steigt die  $k_f$  2019 von gering (Kalk 0: 8  $\text{cm d}^{-1}$ ) auf mittel (Kalk 1: 16  $\text{cm d}^{-1}$ ).

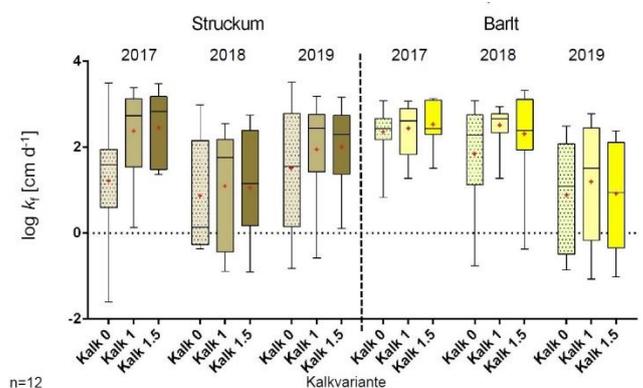


Abb. 1 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten ( $k_f$ ) in  $\text{cm d}^{-1}$  der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 für den Ap-Horizont der Standorte Struckum und Barlt für die Jahre 2017-2019,  $n = 12$

Die Luftkapazität (LK, Poren mit  $\varnothing > 50 \mu\text{m}$ ) gibt Auskunft über das nach einem Niederschlagsereignis schnell wieder luftgefüllte Porenvolumen. An den beiden Standorten konnte im Vergleich zu Kalk 0 eine Zunahme der LK bei mindestens einer der zwei Kalkvarianten in den Jahren 2017-2019 festgestellt werden (Abb. 2).

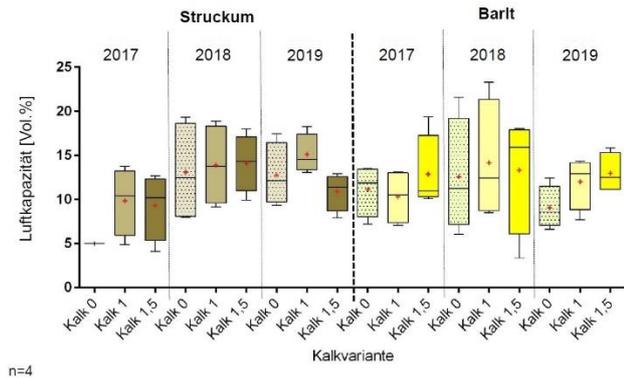


Abb. 2 Luftkapazität [Vol. %] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 für den Ap-Horizont der Standorte Struckum und Barlt für die Jahre 2017-2019, n = 4

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) eines Bodens ist aus pflanzenbaulicher Sicht von großer Bedeutung, da sie das Porenvolumen repräsentiert, in dem langfristig pflanzenverfügbar gebundenes Wasser gespeichert ist. Die nFK ist an den Standorten Struckum und Barlt auf den Kalkvarianten im Vergleich zur Kalk 0 Variante nahezu unverändert. Im Jahr 2017 ist für die Kalk 1,5 Variante eine Erhöhung der nFK am Standort Struckum zu erkennen (Abb. 3).

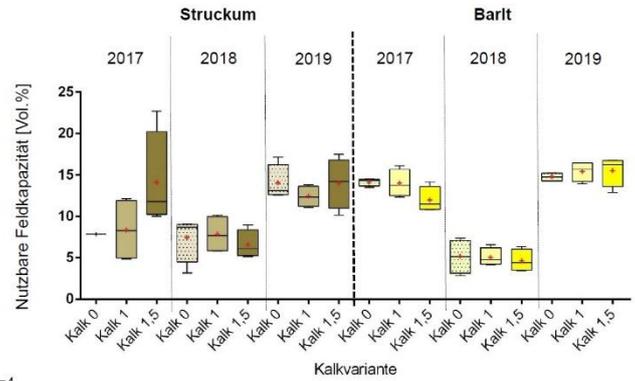


Abb. 3 Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 für den Ap-Horizont der Standorte Struckum und Barlt für die Jahre 2017-2019, n = 4

Bei steigender Kalkzugabe steigt an allen Standorten bei mindestens einer Kalkvariante die Kohäsion (c) mit gleichzeitig leicht abnehmendem Winkel der Inneren Reibung ( $\phi$ ) (Tab. 2).

Tab. 2 Winkel der inneren Reibung  $\phi$  (°) und Kohäsion c (kPa) der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 für den Ap-Horizont der Standorte Struckum und Barlt für die Jahre 2017-2019, n = 2

Variante	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c
	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)
	2017		2018		2019	
Kalk 0	36,8	19,3	35,9	17,5	33,3	17,4
Kalk 1	35,2	22,2	35,2	18,8	36,5	15,2
Kalk 1,5	39,8	18,7	33,5	20,6	33,5	24,3

Variante	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c
	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)
	2017		2018		2019	
Kalk 0	36,9	8,9	32,3	25,9	34,9	11,7
Kalk 1	29,3	24,6	31,5	29,7	29,5	20,8
Kalk 1,5	25,7	33,2	32,0	31,9	29,9	17,8

Am Standort Barlt steigt die Zugspannung (Y) der Aggregate 12 Monate nach der Kalkung (2017) auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Varianten im Vergleich zu Kalk 0 leicht an, wobei die Variante Kalk 1 die höchsten Zugspannungswerte erreicht (Abb. 4). Die damit höhere Aggregatstabilität in den Kalkvarianten ist auch 24 Monate nach der Kalkausbringung (2018) noch nachweisbar. Insbesondere zeigt sich dies auch an den

auf -300 hPa vorentwässerten Proben. Im Allgemeinen finden sich für die feuchteren Aggregate geringe Zugspannungswerte (2018 und 2019), dennoch ist Y in den Kalk 1 und Kalk 1,5 Varianten signifikant höher als in der Kalk 0 Variante.

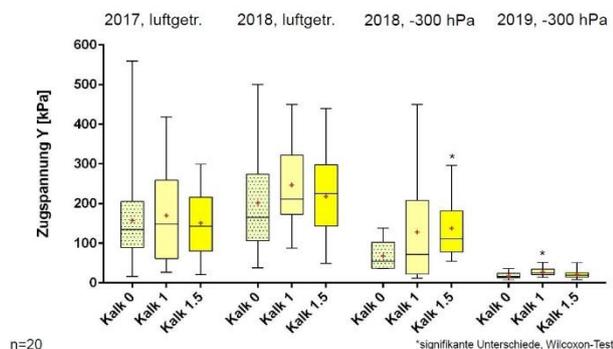


Abb. 4 Aggregatstabilität dargestellt als Zugspannung Y [kPa] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1,5 gemessen an luftgetrockneten und auf -300 hPa entwässerten Aggregaten (< 16 mm) aus dem Ap-Horizont des Standortes Barlt für die Jahre 2017-2019, n = 20

## Zusammenfassung

Durch eine einmalige Kalkung konnte am Standort Struckum in der Kalk 1 und Kalk 1,5 Variante (2017) der Ziel-pH-Wert nicht erreicht werden. Es wird aus praxisnaher Sicht eine zweimalige Kalkung und somit eine Splittung der Kalkgabe empfohlen. Auch sollte die Kalkmenge entsprechend der Berechnung erfolgen können und die Obergrenzen für die jährliche Ausbringungsmenge überarbeitet werden. Die gesteigerten Wasserleitfähigkeiten lassen auf eine verbesserte Durchlässigkeit des Ap-Horizontes schließen und somit ist auch das Erosionspotential an den beiden Standorten verringert. Außerdem ist eine Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu den weiten Grobporen sichtbar. Dies zeigt sich in

den erhöhten Luftkapazitäten auf den Kalkvarianten an beiden Standorten. Die nutzbare Feldkapazität hingegen zeigt noch kaum Veränderungen. Die mechanischen Scherparameter, insbesondere die Kohäsion (c), steigen auf den gekalkten Varianten an beiden Standorten. Dies spricht für eine Verfestigung zwischen den Partikeln an den Grenzflächen zwischen fester und flüssiger Phase im Boden (Beetham, 2015; Bell, 1996; Hartge, 1959). Durch die jährliche Bodenbearbeitung reicht diese Verklebung jedoch noch nicht aus, um die Stabilität langfristig gegenüber mechanischer Belastung aufrecht zu erhalten. Die Ergebnisse der Zugspannung (Y) zeigen, dass eine Kalkung zu einer verbesserten Aggregatstabilität führen kann. Es ist jedoch, wenn eine Strukturentwicklung erzeugt werden soll, der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung, hinsichtlich Witterung, zu beachten. Auch sollte eine schonende oder pfluglose Bewirtschaftung in Betracht gezogen werden, um die Strukturverbesserung durch die Kalkung zu unterstützen.

## Danksagung

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung des Projektes 33068/01. Ebenfalls geht ein Dank an die Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein sowie der Düngekalk Hauptgemeinschaft für die Unterstützung und Zusammenarbeit im Projekt.

## Literatur

- Beetham, P., 2015. Enhancing the understanding of lime stabilisation processes. Loughborough University Institutional Repository, 1–232.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223–237. 10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011. *Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*, 3rd ed. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 255 pp.
- Cuisinier, O., Auriol, J.-C., Le Borgne, T., Deneele, D., 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology* 123, 187–193. 10.1016/j.enggeo.2011.07.010.
- Dexter, A.R., Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31, 139–147. 10.1016/0021-8634(85)90066-6.
- DIN ISO 11260, 2018. Soil quality - Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution.
- Hartge, K.H., 1959. Ursachen der Verbesserung der Strukturstabilität von Ackerböden durch eine Kalkung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 85, 214–227.
- Hartge, K.H., 1993. Saturated hydraulic conductivity measurement at soil core samples and its evaluation. *Soil Technology* 6, 115–121.
- Hartge, K.H., Horn, R., 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden: [Praxis, Messmethoden, Auswertung]*, 4th ed. Schweizerbart, Stuttgart, 178 pp.
- 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. 10.1023/A:1009738307837.
- Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., Gensior, A., Poeplau, C., Riggers, C., Schneider, F., Tiemeyer, B., Vos, C., Wittnebel, M., Müller, T., Säurich, A., Fahrion-Nitschke, A., Gebbert, S., Hopfstock, R., Jaconi, A., Kolata, H., Lorbeer, M., Schröder, J., Laggner, A., Weiser, C., Freibauer, A., 2018. *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Germany, 1323 pp.
- Kézdi, Á., Rétháti, L., 1988. *Soil mechanics of earthworks, foundations and highway engineering*. Elsevier, Amsterdam, 361 pp.
- Lausen, P., 2012. Kalkung wird oft vernachlässigt: Düngung auf Acker - und Grünlandflächen. *Bauernblatt*, 34–39.
- Raun, W.R., Johnson, G.V., 1999. Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal* 91, 357–363.
- VDLUFA, 2000. *Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker - und Grünlandböden*. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs - und Forschungsanstalten.