

Tagungsbeitrag zu:

Jahrestagung der DBG, Kommission VI

Titel der Tagung: Horizonte des Bodens**Veranstalter:** DBG**Termin und Ort:** 2.-7. 9. 2017, Göttingen**Berichte der DBG** (nicht begutachtete online Publikation), <http://www.dbges.de>**Strukturmelioration durch Branntkalk auf Friedhofsböden: Auswirkungen auf den O₂- und CO₂-Gasfluss**A. Mordhorst¹, S. Filser, I. Zimmermann¹, H. Fleige¹, R. Horn¹**Zusammenfassung**

Im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes wurde die Eignung von Branntkalk (CaO) zur kostengünstigen Strukturmelioration von Friedhofsböden untersucht. Ein vorrangiges Ziel ist es dabei, die Belüftungseigenschaften im Erdgrab zu verbessern, um Verwesungsstörungen durch eine unzureichende Sauerstoffnachlieferung von der Atmosphäre zur Sargzone zu verhindern. Hierzu wurden u.a. auf einem Friedhof (Normrigosol aus Sandlöss, „Ref“-Variante) angelegte Grabsimulationen beprobt, bei denen der Bodenaushub ohne („Null“-Variante) und mit einer Beimengung von 20 kg CaO pro m³ („CaO“-Variante) in das Erdgrab (ohne Beisetzung eines Leichnams) zurückverfüllt wurde. Veränderung der Gastransporteigenschaften (konvektiver und diffusiver Gasfluss) und der Bodenrespirationsrate bei Feldkapazität

(-6 kPa) wurden über einen Zeitraum von 2 Jahren untersucht.

Im Vergleich zur „Ref“- und „Null“-Variante zeigte sich durch die Zugabe von CaO eine deutliche Steigerung der Diffusivität und Luftleitfähigkeit, die über den 2-jährigen Betrachtungszeitraum in beiden Beprobungstiefen (50 und 90 cm) bestehen bleibt. Die durch die lockere Schüttung geschaffene höhere Porosität in der CaO-Variante wies demzufolge auch eine höhere Funktionalität in Bezug auf den Gastransport auf. Dies belegten u.a. die ermittelten Porenkontinuitätsindices (C₁).

Bei der Bodenrespirationsrate (Basalatmung) konnten im Messzeitraum bei CaO-Zugabe sowohl Zu- als auch Abnahmen im Vergleich zur „Null“-Variante beobachtet werden. Hinweise auf eine negative Beeinträchtigung des Bodenlebens bzw. der biologischen Aktivität durch die alkalisch wirkende CaO-Zugabe waren nicht festzustellen. Zudem werden die gemessenen CO₂-Raten in der CaO-Variante eher unterschätzt, da mikrobiell freigesetztes CO₂ durch die ablaufende Carbonatisierung wieder chemisch gebunden wird. Die Zugabe von CaO eignet sich damit als Maßnahme zur Strukturmelioration von Friedhofsböden, da es den Bodenaushub beim Verfüllen des Grabes sofort stabilisiert und damit ein über den Messzeitraum von 2 Jahren beständiges leitfähiges Porensystem geschaffen wird, das eine ausreichende Sauerstoffversorgung im Erdgrab gewährleistet und somit den Verwesungsprozess begünstigt.

¹ Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str.2, 24118 Kiel. *a.mordhorst@soils.uni-kiel.de

Schlüsselworte: Branntkalk (CaO), Friedhofsboden, Verwesungsstörungen, O₂-Diffusivität, Luftleitfähigkeit, CO₂-Respiration, Strukturmelioration

Einleitung

Grabarbeiten bei Erdbestattungen führen zunächst zu einer Lockerung des geschütteten Bodens, die allerdings häufig in Folge von eintretender Sackung nicht dauerhaft erhalten bleibt. Zudem werden durch das Aufbrechen der Bodenstruktur die für den Gastransport wichtigen sekundären Poren zerstört. Ein gestörter Gashaushalt kann wiederum eine langsame oder auch ausbleibende Verwesung der Leiche (Bildung von Wachsleichen) verursachen (FRÜND & SCHOENEN, 2009). Friedhöfe stellt dies vor planerische und auch finanzielle Probleme, da die üblichen Sanierungsmaßnahmen (Bodenaustausch, Grabkammern, etc.) kostenintensiv sind. Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes wurde daher die Eignung von Branntkalk (CaO) zur Strukturmelioration des bei Grabarbeiten geschütteten Bodens untersucht.

Auswirkungen der CaO-Zugabe auf den Gastransport zwischen Atmosphäre und Sargzone werden anhand der Parameter Luftleitfähigkeit (k_l) und O₂-Diffusivität (D_s/D_o) sowie der CO₂-Respirationsrate aufgezeigt. Letztere kann als Maß für die biologische Aktivität im Boden herangezogen werden, die durch die alkalisch wirkende CaO-Zugabe (Anstieg des pH-Wertes auf ca. 12) beeinträchtigt werden könnte, da der für die Aktivität der Bodenlebewesen optimale pH-Bereich überschritten wird (SCHOTSMANS et al., 2014).

Material und Methoden

Auf einem Friedhof in Norddeutschland (pseudovergleyter Normrigosol aus Sandlöss (Su3), pH um 6, „Ref“-Variante) wurden im Frühjahr 2014 zwei Grabsimulationen (9 m Länge x 2 m Breite x 1,6 m Tiefe) angelegt, bei denen der Bodenaushub ohne („Null“-Variante) und mit einer Beimengung von 20 kg gekörntem CaO pro m³ („CaO“-Variante) in das Erdgrab (ohne Beisetzung eines Leichnams) zurückverfüllt wurde. Im vierteljährlichen Turnus wurden aus beiden Grabsimulationen ungestörte Stechzylinderproben aus 50 und 90 cm Tiefe über einen Zeitraum von 2 Jahren entnommen, im Labor kapillar aufgesättigt und anschließend auf Sandbädern mit hängender Wassersäule auf Feldkapazität (- 6 kPa) entwässert. Die Luftleitfähigkeit (k_l) wurde als stationärer Fluss und definiertem Gradienten von 1 hPa gemessen (für methodische Details siehe PETH, 2004). Die O₂-Diffusivität (D_s/D_o) wurde in einem Doppelkammerexperiment (ROLSTON & MOLDRUP, 2002) unter Verwendung von O₂-Mikrosensoren (Unisense A/S) erfasst. Als ein Maß für den funktionalen Anteil an luftgefüllten Poren (θ_a), der für den diffusiven Gastransport zur Verfügung steht, dient der Porenkontinuitätsindex C_1 nach BALL et al (1988) (Gl. 1):

$$C_1 = \frac{D_s}{D_o \theta_a} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die CO₂-Respirationsrate als Maß für die biologische Aktivität wurde statisch mittels chemischer CO₂-Falle (NaOH) über 24 h bei 22 °C (PELL et al, 2005) an ungestörten, auf -6 kPa vorentwässerten und vorinkubierten (10 Tage) Bodenproben (22 cm³) untersucht. Im Anschluss wurden die Proben luftgetrocknet und auf < 2 mm gesiebt, um den pH-Wert sowie den Gehalt an organischem

Kohlenstoff (C_{org}) und Calciumcarbonat ($CaCO_3$) an jeder inkubierten Bodenprobe nach BLUME et al. (2011) zu ermitteln.

Die statistische Datenanalyse erfolgte mit Hilfe der Statistiksoftware R (R CORE TEAM 2016). Über multiple Kontrasttests (BRETZ et al. 2011) wurden die einzelnen Einflussgrößen auf Signifikanz getestet. Die Stärke der Signifikanz ist mit * ($0,01 < p \leq 0,05$), ** ($0,001 < p \leq 0,01$), und *** ($p \leq 0,001$) gekennzeichnet.

Ergebnisse und Diskussion

O_2 -Fluss: Damit eine ausreichende O_2 -Versorgung für den Verwesungsprozess gewährleistet ist, ist ein möglichst ungestörter Gasaustausch zwischen Atmosphäre, Deckschicht und Sargzone notwendig. Aus bodenphysikalischer Sicht ist hierfür nicht nur die Menge von luftgefüllten Poren (θ_a) (Tab.1), sondern auch deren Kontinuität und Konnektivität entscheidend. Die Porenfunktionalität ist exemplarisch für den Porenindex C_1 (Tab: 1) dargestellt.

Durch die Beimengung von CaO konnte das grobe Porensystem im locker geschütteten Bodenaushub stabilisiert werden. Die Stabilisierung findet zu Beginn durch die initiale Trocknung während der Löschreaktion ($CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{Wärme}$) von CaO statt (WITT, 2002), die eine Zunahme der Kohäsion zwischen den Partikeln durch kontrahierende Wassermenisken erzeugt (BOHNE et al., 1985; HORN UND SMUCKER, 2005). Ein stabileres Porensystem durch eine erhöhte Aggregatstabilität bei CaO-Applikation in geschütteten Böden zeigten u.a. bereits Untersuchungen von HARTGE & ELLIES (1977) oder ZIMMERMANN et al. (2016).

Tab. 1: Veränderung des luftgefüllten Porenvolumens (θ_a) und des Porenindex (C_1) in 50 und 90 cm Tiefe im simulierten Erdgrab ohne („Null“) und mit Zugabe von CaO im Vergleich zur Referenz („Ref“) (pF 1,8).

		Monate nach Verfüllen der Grube							
		0	3	6	9	12	15	18	24
Variante	Tiefe [cm]	θ_a [$m^3 m^{-3}$]							
Ref	50	0,22							
	90	0,20							
Null	50	0,15	0,15	0,13	0,16	0,13	0,18	0,18	
	90	0,18	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11	0,14	
CaO	50	0,29	0,15	0,25	0,26	0,23	0,21	0,27	
	90	0,22	0,12	0,18	0,30	0,24	0,16	0,25	
Variante	Tiefe [cm]	C_1 -Index [-]							
Ref	50	0,12							
	90	0,12							
Null	50	0,06	0,08	0,04	0,07	0,04	0,07	0,12	
	90	0,08	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	
CaO	50	0,16	0,13	0,20	0,19	0,17	0,15	0,21	
	90	0,15	0,13	0,15	0,20	0,19	0,09	0,19	

Der über den gesamten Messzeitraum höhere Anteil an θ_a in der CaO-Variante steht in Zusammenhang mit einer Verbesserung des diffusiven (Abb. 1) und konvektiven Gastransports (k_i) (Abb. 2) im Vergleich zur Ref und Null-Variante.

Während der konvektive Gastransport stärker von der Leitfunktion der größten Pore abhängt, ist für den diffusiven Transport die Funktionalität des gesamten luftgefüllten Porenvolumens entscheidend (siehe C_1 -Index) (BALL et al. 1988; STEPNIIEWSKI & GLINSKI., 1985). Durch die Erhöhung des Anteils dieser stabilen und zugleich leitfähigeren (höherer C_1 -Index, siehe Tab. 1) luftgefüllten Poren konnte in der CaO-Variante eine deutliche Steigerung der Diffusivität (D_s/D_o) in 50 und 90 cm Bodentiefe im Vergleich zu „Ref“ und „Null“ erreicht werden, die über den Messzeitraum von 24 Monaten bestehen bleibt (Abb. 1).

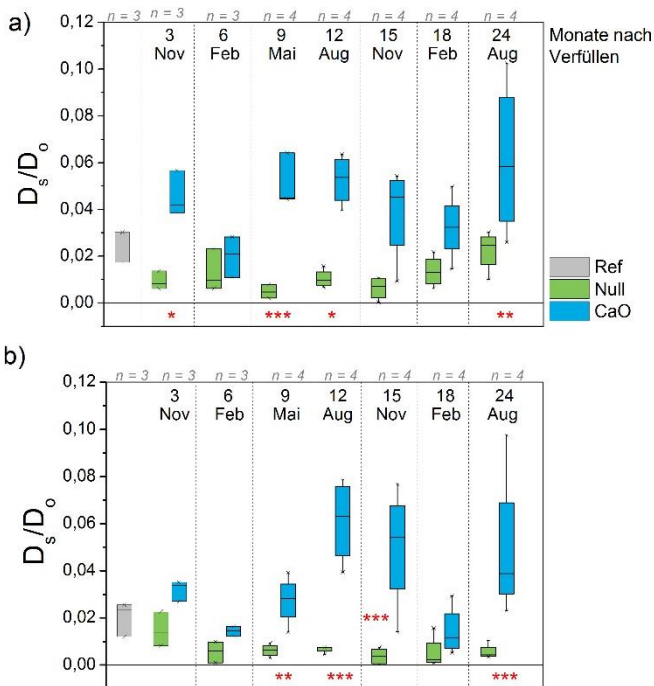


Abbildung 1: Zeitliche Veränderung des relativen Diffusionskoeffizienten (D_s/D_o) in 50 (a) und 90 cm Tiefe (b) im simulierten Erdgrab ohne („Null“) und mit Zugabe von CaO im Vergleich zur Referenz („Ref“) (pF 1,8). * . ** und * kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ und $p \leq 0,001$).**

Während die D_s/D_o -Werte von „Null“ in 50 cm über längere Zeiträume unterhalb von „Ref“ blieben und damit für einen Großteil vergleichbar mit denen von verdichteten tonreichen Böden ($D_s/D_o < 0,01$) (STEPNIEWSKI et al. 1994) sind, stiegen die Werte von „CaO“ insbesondere im Sommerhalbjahr auf das Dreifache im Vergleich zur Null-Variante an. Letztere erreichte erst nach 24 Monaten eine Diffusivität von $> 0,02$. Hoch signifikante Unterschiede (p -Wert $< 0,001$) zwischen „Null“ und „CaO“ werden damit in Abhängigkeit der Beprobungszeit sowohl in 50 cm aber insbesondere auch in 90 cm Tiefe erzielt.

Die k_i -Mediane (Abb. 2) lagen überwiegend im „mittleren“ bis „sehr hohen“ Bereich (DVWK, 1997), während die der „Null“-Vari-

ante im „sehr geringen“ bis „geringen“ Bereich vorzufinden waren und nur in 50 cm mit der Zeit leicht anstiegen (analog zu C_1 -Indices), was auf eine intensivere Struktur- bildung durch Quellungs- und Schrump- fungsprozesse zurückgeführt werden kann, die in 90 cm erwartungsgemäß weniger stark ausgeprägt sind.

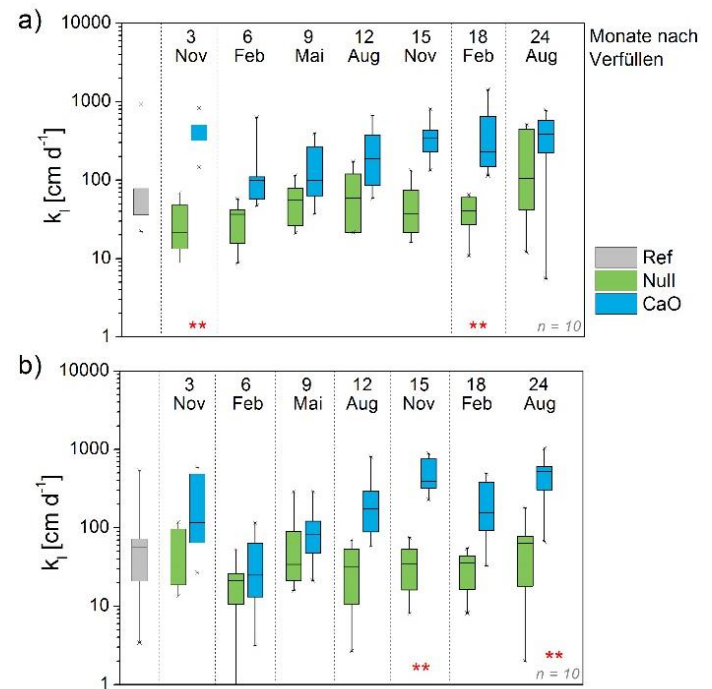


Abbildung 2: Zeitliche Veränderung der Luftleitfähigkeit (k_i) in 50 (a) und 90 cm Tiefe (b) im simulierten Erdgrab ohne („Null“) und mit Zugabe von CaO im Vergleich zur Referenz („Ref“) (pF 1,8). * . ** und * kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ und $p \leq 0,001$).**

CO₂-Fluss:

Bei der Bodenrespirationsrate konnten im Messzeitraum von 2 Jahren bei CaO-Zugabe sowohl Zu- als auch Abnahmen im Vergleich zur Null-Variante beobachtet werden (Abb. 3). So waren zu Beginn (3 Monate nach Verfüllen der Gruben) und gegen Ende des Zeitraumes (nach 15 Monaten) sogar höhere Respirationsraten bei CaO-Applikation zu beobachten, während nach 6

und 9 Monaten negative CO₂-Raten (CO₂-Aufnahme) messbar waren. Diese beruhen voraussichtlich auf den im Boden ablaufenden Carbonatisierungsprozess

(CaO → Ca(OH)₂ → CaCO₃), bei dem mikrobiell freigesetztes CO₂ wieder chemisch gebunden wird (SCHOTSMANS et al., 2014).

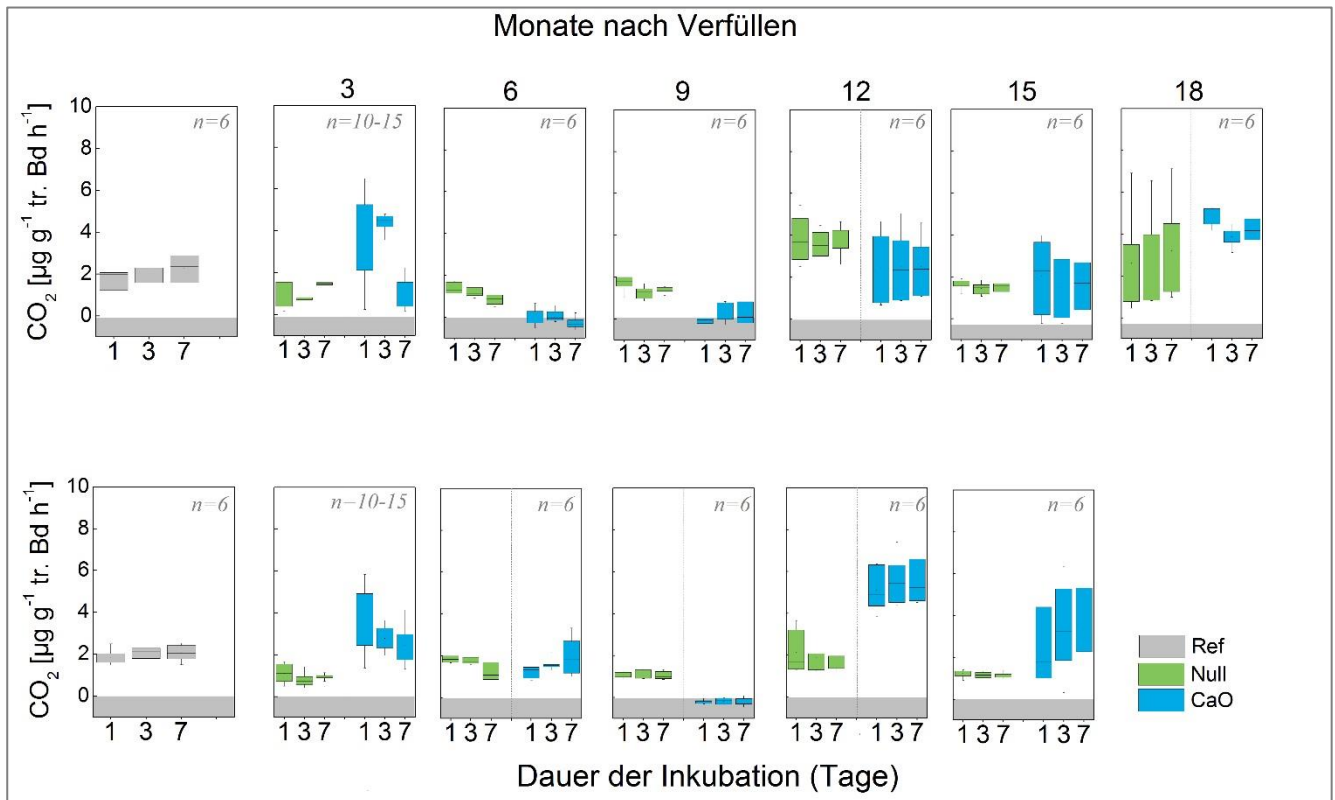


Abbildung 3: Zeitliche Veränderung der CO₂-Respirationsrate (µg CO₂ g⁻¹ getrockneter Boden h⁻¹) von inkubierten Bodenproben (pF 1,8) aus 50 und 90 cm Tiefe des simulierten Erdgrabs mit („CaO“) und ohne („Null“) Zugabe von CaO im Vergleich zur Referenz („Ref“)

Erhöhte CaCO₃-Werte (bis zu 6,3 %, Tab. 2) in Proben mit negativen CO₂-Raten bekräftigen diese Annahme (Abb. 3).

Die CaO-Applikation erhöht den pH-Wert von einem „sehr schwach sauren“ (6,1 – 6,8) Bereich (AD-HOC-AG BODEN, 2005) in der „Null“-Variante auf einen mittleren pH-Wert im „sehr stark alkalischen“ Bereich (pH 10) 6 Monate nach der Verfüllung. Die pH-Werte verringern sich mit der Zeit auf Werte um 8, die im „schwach alkalischen“ Bereich liegen.

Obwohl dabei die für Bodenlebewesen optimalen pH-Werte (leicht saurer bis leicht alkalisch) kurzzeitig überschritten werden, ist nachweislich, wie auch bei vergleichbaren Untersuchungen von DELTEDESCO et al. (2015), keine länger anhaltende Beeinträchtigung der biologischen Aktivität (CO₂-Respiration) innerhalb der 2 Jahre nach der Zugabe von Branntkalk eingetreten (für weitere Details siehe MORDHORST et al., 2017).

Tab. 2: Veränderung von pH-Wert, C_{org}- sowie CaCO₃-Gehalt der Respirationsproben aus 50 und 90 cm Tiefe im simulierten Erdgrab ohne („Null“) und mit Zugabe von CaO im Vergleich zur Referenz („Ref“).

		Monate nach Verfüllen der Grube						
		0	3	6	9	12	15	18
Variante	Tiefe [cm]	pH in CaCl ₂						
Ref	50	6,0						
	90	6,7						
Null	50	6,3	6,5	6,3	6,0	6,3	6,2	
	90	6,1	6,7	6,3	6,4	6,5	-	
CaO	50	8,1	10,6	9,9	8,4	8,6	8,0	
	90	7,9	7,6	9,4	8,1	8,9	-	
Variante	Tiefe [cm]	C _{org} [%]						
Ref	50	0,7						
	90	0,8						
Null	50	0,6	0,7	0,7	1,5	0,4	0,9	
	90	0,7	0,4	0,4	0,4	0,7	-	
CaO	50	0,6	0,4	0,6	1,1	0,3	0,9	
	90	0,5	0,5	0,4	1,0	0,6	-	
Variante	Tiefe [cm]	CaCO ₃ [%]						
Ref	50	0,0						
	90	0,0						
Null	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
CaO	50	3,3	3,4	6,3	1,1	1,8	2,2	
	90	0,6	0,7	3,8	2,2	3,2	-	

Literatur

AD-HOC-AG BODEN (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. Hrsg. von Ad hoc Arbeitsgruppe Boden. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.

BALL, B. C., M. F. O'SULLIVAN und R. HUNTER (1988). Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *Journal of Soil Science* 39.3, S. 327–339.

BLUME, H.-P., STAHR, K., LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Germany.

BOHNE, H., K. H. HARTGE und H. GRAF VON REICHENBACH (1985). Einfluß und Wirkungsweise von CaO bei der Belastung von Aggregaten. In: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. Springer, S. 672–680.

BRETZ, F., T. HOTHORN und P. WESTFALL (2011). Multiple comparisons using R. CRC Press

DELTEDESCO, E., L.-M. BAUER, H. UNTERFRAUNER, R. PETICZKA, F. ZEHETNER

und K. M. KEIBLINGER (2015). Effekt von Kalkungsmaßnahmen auf die Strukturstabilisierung und Mikrobiologie von landwirtschaftlichen Böden. In: *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 82, S. 19–26.

DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil II: Ableitung physikalischer Bodenkenngrößen. Merkblätter 235. Wirtschaftsges. und Verlagsges. Gas und Wasser, Bonn.

FRÜND, H.-C., D. SCHOENEN (2009): Quantification of adipocere degradation with and without access to oxygen and to the living soil. *Forensic Sci. Int.* 188, 18–22.

HARTGE, K. H. und A. ELLIES (1976). Über die Wirkung von Branntkalk als Stabilisator von Verfüllungsmaterial in Dränggraben. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*.

HORN, R. und A. SMUCKER (2005). Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82.1, S. 5–14.

MORDHORST, A. I. ZIMMERMAN, H. FLEIGE, R. HORN (2017): Changes in soil aeration and soil respiration of simulated grave soils after quicklime application. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2, 153-164. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.

PELL, M., J. STENSTRÖM und U. GRANHALL (2005). Soil respiration. Microbiological methods for assessing soil quality. In: VON J. BLOEM, D. W. HOPKINS und A. BENEDETTI. Wageningen: CABI, S. 117–127.

PETH, S. (2004). Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarctisch-alpinen Tundrenstandorten. Diss. Universität Kiel.

R CORE TEAM (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.

ROLSTON, D. E. und P. MOLDRUP (2002). Gas Diffusivity. In: *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, S. 1113–1139.

- SCHOTSMANS, E. M., J. DENTON, J.N. FLETCHER, R. C. JANAWAY, A.S WILSON (2014): Short-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Laboratory experiments. *Forensic Sci. Int.* 238, 142.e1–142.e10.
- STEPNIEWSKI, W. und J. GLINSKI (1985). *Soil aeration and its role for plants*. CRC Press, Inc.
- STEPNIEWSKI, W., B. C. BALL, B. D. SOANE und C. VAN OUWERKERK (1994). Effects of compaction on soil aeration properties. *Soil compaction in crop production*. S. 167–189.
- WITT, K. J. (2002). *Zement–Kalk–Stabilisierung von Böden*. Geotechnik Seminar Weimar 2002.
- ZIMMERMANN, I., H. FLEIGE, R. HORN (2016): Soil structure amelioration with quicklime and irrigation experiments in earth graves. *J. Soil. Sediment.* 16, 2514–2522.