

Einfluss von Biogasgärresten auf Dispergierungsprozesse in Böden – welche Bedeutung hat die Körnung und Wertigkeit von Kationen

A. Voelkner und R. Horn

Influence of anaerobic digestates on dispersion of soils – impact of soil texture and cations of different valence

1 Einleitung

Seit der Einführung von Subventionszahlungen für die Erzeugung von erneuerbarer Energie stieg die Anzahl an Biogasanlagen in den letzten Jahren stetig an. Die Biogaserzeugung erfolgt auf Basis der anaeroben Fermentation organischer Reststoffen (ODLARE et al., 2011), bei der Strom oder Wärme als erneuerbare Energie entsteht (GERICKE et al., 2007). Zusätzlich bildet sich der Gärrest, ein Beiprodukt, der aufgrund seiner hohen Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen als organisches Düngemittel auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht wird (ALBURQUERQUE et al., 2012) und bei der Berechnung des Düngedarfes für die Folgefrucht mit angerechnet werden soll. Außerdem geht man davon aus, dass die Zufuhr von im

Gärrest ebenfalls vorhandener zusätzlicher organischer Substanz die Bodenfruchtbarkeit erhöht (ÁLVAREZ et al., 2010) und die Bodenstruktur durch die Aggregation von Primärteilchen verbessert (TAVARES FILHO et al., 2010). Hierbei bleibt aber der Einfluss der Zusammensetzung der organischen Substanz unberücksichtigt, wobei davon ausgegangen werden muss, dass es sich vorwiegend um wenig reaktive C-Verbindungen (z. B. Lignin oder Hemicellulose) handelt. Außerdem kann die mit dem Gärrest zugeführte große Menge an monovalenten Kationen auch nachteilige Effekte auf den Boden haben (APARICIO et al., 2009). So tragen einwertige Salze wie Natrium oder Kalium in Abhängigkeit vom Gehalt und der Art der vorhandenen Tonminerale, aggregierenden organischen Substanzen, der Menge löslicher Salze, dem pH-Wert sowie dem Anteil an aus-

Summary

The by-products of the biogas production are digestates, which are used as nutrient-rich organic fertilizer on agricultural soils. The applied digestates add besides polyvalent ions, also vast amounts of monovalent cations (e.g. sodium and potassium) and carbon (lignin, hemicellulose) to the soil matrix. Especially the monovalent salts can induce soil dispersion and, thus, contribute to the weakening and degradation of an intact soil structure. To quantify the vulnerability of a soil to disperse after the application of digestates, the amount of readily dispersible clay (RDC) can be used. From the amount of RDC, it is possible to deduce the soil stability at the particle-scale. The consequences of soil dispersion are crusting, colloid leaching and erosion of soil surfaces. Therefore, the aim of this study was to assess the impact of a medium amount of digestates (equivalent to 30 m³ ha⁻¹) of maize and sugar beet silage on clay dispersion and the cation exchange capacity (CEC) of a Cambic Luvisol and a Podsol at different scales. The digestates were applied at the surface of homogenized and structured lysimeters. The results showed dispersing but also aggregating processes, especially in the structured soil (up to fivefold higher amounts of RDC were found). The application of digestates from maize monofermentation containing more sodium resulted in increased dispersion of soil particles. Nevertheless, besides the amount of monovalent cations, the accessibility of sorption sites of soil particles appeared to be the most important factor for the development of soil dispersion.

Key words: Anaerobic digestates, dispersion, readily dispersible clay (RDC), cation exchange capacity, soil stability.

Zusammenfassung

Die im Zuge der Biogaserzeugung entstehenden Gärreste werden als nährstoffreiche organische Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Durch ihre Applikation werden neben polyvalenten Ionen große Mengen an monovalenten Kationen, wie Natrium oder Kalium, der Bodenmatrix zugeführt, wodurch Dispergierungsprozesse induziert und die intakte Bodenstruktur geschwächt wird. Um die Dispergierungsneigung des Bodens unter Gärresteinfluss zu quantifizieren, wird der Anteil an dispergiertem Ton (readily dispersible clay = RDC) ermittelt, von dem sich auf Partikelebene die Bodenstabilität ableiten lässt. Folgen der Dispergierung sind Verschlammung und Krustenbildung auf der Bodenoberfläche und dadurch verstärkte Erosionsprozesse. Daher war das Ziel dieser Studie, den Einfluss einer praxisüblichen Gärrestmenge (äquivalent zu $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) aus Mais als Monofermentation oder in Kofermentation mit Zuckerrüben auf die Dispergierung und die Kationenaustauschkapazität (KAK) einer lehmigen Parabraunerde und eines sandigen Podsols skalenübergreifend anhand von homogenisiertem Boden sowie strukturierten Kleinlysimetern zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass nach Gärrestapplikation sowohl dispergierende als auch aggregierende Prozesse im Boden einsetzen, die in Abhängigkeit von der bodeneigenen Struktur unterschiedlich ausgeprägt sind; im strukturierten Boden konnte ein 5-fach höherer Anteil an RDC nachgewiesen werden. Nach der Zufuhr von Gärrest aus Mais in Monofermentation kommt es aufgrund seines hohen Natriumgehaltes zu einer verstärkten Dispergierung des Bodens. Neben der Menge an monovalenten Kationen ist die Zugänglichkeit von Sorptionsflächen der Bodenpartikel für die Aufnahme von Kationen entscheidend für Dispergierungsprozesse.

Schlagwörter: Anaerobe Gärreste, Dispergierung, readily dispersible clay (RDC), Kationenaustauschkapazität, Bodenstabilität.

tauschbaren Kationen zur Dispergierung von Böden bei (BRONICK & LAL, 2005; SHAW et al., 2003). Dispergierung von Bodenpartikeln führt neben Verschlammung und Verkrustung der Bodenoberfläche zum Oberflächenabfluss und somit zu erosiven Prozessen (CZYŻ et al., 2002). Polyvalente Kationen hingegen (v. a. Calcium) fördern die Aggregation von Bodenpartikeln durch die Bildung von stabilen Calciumbrücken.

Die Auswirkungen von mono- und polyvalenten Kationen auf die Dispergierung bzw. Aggregation der Böden wurde vielfach untersucht. Über den Beitrag von anaeroben Gärresten zur Dispergierung von Böden durch vorhandene Kationen ist hingegen bislang wenig bekannt. Um einen Überblick über die Wechselwirkungen von Gärresten und Bodenstabilität zu erhalten, wurden die Auswirkung von unterschiedlichen Gärresten und deren Kationenzusammensetzung auf die Dispergierung einer Parabraunerde und eines Podsols in Abhängigkeit ihres Strukturierungsgrades untersucht. Dabei wurde hypothetisiert, dass die Zufuhr von Gärresten durch den Eintrag von monovalenten Kationen die Dispergierung insbesondere im lehmigen Boden fördert und die Dispergierungsneigung maßgeblich vom Tongehalt des Bodens bestimmt wird.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete und Böden

Die Untersuchungsgebiete befanden sich auf zwei Versuchsgütern der Universität Kiel. Im Sommer 2013 wurden gestörte Bodenproben aus dem gepflügten Oberbodenhorizont (Ap, 0–10 cm) am Standort Hohenschulen (HS) im östlichen Hügelland aus einer Parabraunerde aus Geschiebemergel und am Standort Karkendamm (KD) aus einem Podsol aus Flugsanden entnommen. Der Boden am Standort Hohenschulen wurde als stark sandiger Lehm (Sl4), der Boden am Standort Karkendamm als sandiger Sand (Ss) klassifiziert (AG BODEN, 2005). Beide Böden sind schwach sauer, wobei der pH-Wert des sandigen Bodens um eine Einheit unter demjenigen des lehmigen Bodens lag (Tabelle 1). Der Podsol zeigte einen dreifach höheren Kohlenstoffgehalt verglichen mit der Parabraunerde, da aufgrund von Tiefumbruchmaßnahmen zur Verbesserung der Wasser- und Luftleitfähigkeiten in den 80er Jahren, wurde der kohlenstoffreiche Unterbodenhorizont in den Oberboden gepflügt. Nach ihrer Entnahme wurden die Bodenproben luftgetrocknet, homogenisiert und anschließend auf $\leq 2 \text{ mm}$ gesiebt. Zusätzlich zu den gestörten Proben wurden strukturierte Proben in Kleinlysimetern entnommen (Höhe: 15 cm; Durchmesser: 12,5 cm). Die Untersuchun-

gen der chemischen Bodenkenngrößen erfolgte nach Standardverfahren (SCHLICHTING et al., 2005).

2.2 Gärreste

Die Gärreste wurden in Batch-Gärversuchen im Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel produziert. Das Inokulum (mikrobielles Substrat für die anaerobe Fermentation) stammte aus der Biogasanlage in Bülk und wurde mit 20–30 g des Inputsubstrates (der Silage) aus Mais bzw. Zuckerrüben in unterschiedlichen Mengenverhältnissen versehen. Die Mischung wurde für 28 Tage bei 38 °C mit neunfacher Wiederholung je Inputsubstrat in Mono- und Kofermentation vergoren. Vor der Applikation auf den Boden wurde eine Mischprobe (n = 1) aus jeder Variante hergestellt. Folgende Mengenverhältnisse der Inputsubstrate wurden für die Gärresterzeugung eingesetzt:

1. 100 % Mais (M100)
2. 100 % Zuckerrübe (R100)
3. 80 % Zuckerrübe und 20 % Mais (R80M20)
4. 80 % Mais und 20 % Zuckerrübe (M80R20)

Zusätzlich wurde eine Kontrollvariante etabliert, die analog zu den Gärresten die gleiche Menge an destilliertem Wasser

erhielt. Die Analyse der Gärreste erfolgte durch die LUFA GmbH, Kiel (Tabelle 2).

Die Gärreste wiesen ein alkalisches Milieu auf. Das Essigsäureäquivalent (Summenparameter aus Essigsäure, Buttersäure, Propionsäure, Valeriansäure und Capronsäure) der Gärreste aus Kofermentation R80M20 und M80R20 lag über dem der Gärreste aus Monofermentation. Der Anteil an Natrium im Gärrest aus Mais überschritt den Natriumgehalt der übrigen Gärreste, insgesamt lag der Natriumanteil in den Gärresten aus Monofermentation über dem der Gärreste aus Kofermentation (Tabelle 2).

2.3 Versuchsdurchführung

Um den Einfluss der Gärsubstrate auf ihre dispergierende Wirkung zu untersuchen, wurden sowohl die homogenisierten als auch die strukturierten Bodenproben gleichermaßen mit Gärresten beaufschlagt. Bei den luftgetrockneten und homogenisierten Proben wurden in 10-facher Wiederholung Zylinder (Höhe: 6 cm, Volumen: 471 cm³) auf eine definierte Lagerungsdichte von 1,45 g cm⁻³ verdichtet. In Übereinstimmung mit der praxisüblichen Ausbringungsmenge von 30 m³ ha⁻¹ wurden 35 ml des jewei-

Tabelle 1: Eigenschaften der Ap-Horizonte (0–10 cm) der Standorte Hohenschulen (HS) (Parabraunerde) und Karkendamm (KD) (Podsol)
Table 1: Properties of the Ap-horizon (0–10 cm) at the experimental sites Hohenschulen (HS) and Karkendamm (KD)

	pH (0,02 m CaCl ₂) [-]	El. Leitfähigkeit [μS cm ⁻¹]	Org. Kohlenstoff [%]	Gesamtstickstoff [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
HS	6,6	404	1,2	0,7	16,6	27,2	56,2
KD	5,6	97	3,1	1,3	2,6	5,8	91,6

Tabelle 2: Chemische Eigenschaften der verwendeten Gärreste
Table 2: Chemical properties of the digestates used in this study

	M100	R100	R80M20	M80R20
EC [μS cm ⁻¹]	83	82	85	87
pH [-]	7,9	7,9	7,8	7,9
Essigsäure [g kg ⁻¹ OS]	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Essigsäureäquivalent	170	170	240	270
Trockenmasse [% OS]	3,0	2,8	2,9	3,2
NH ₄ -N [% OS]	0,1	0,1	0,1	0,2
Gesamt-N [% OS]	0,2	0,2	0,3	0,3
P [% OS]	0,3	0,3	0,2	0,2
K [% OS]	0,04	0,03	0,03	0,04
Mg [% OS]	0,03	0,03	0,02	0,02
Ca [% OS]	0,03	0,02	0,02	0,02
Na [mg kg ⁻¹ OS]	179	167	140	145

ligen Gärrestes bzw. des destillierten Wassers auf die Oberfläche der Zylinder appliziert. Jede der Varianten wurde in zweifacher Wiederholung analysiert. Die mit Gärrest bzw. destilliertem Wasser versehenen Zylinder wurden für 10 Tage auf – 60 hPa bis zum Erreichen des Gleichgewichts des Matrixpotentials vorentwässert. Anschließend wurde die erste Tiefe des Zylinders (Bodenschicht direkt unter dem Gärresteinfluss) abgetrennt und 20 g des feuchten Materials zur Erfassung des Anteils an dispergiertem Ton (RDC) entnommen. Der verbleibende Boden wurde luftgetrocknet, erneut homogenisiert und auf ≤ 2 mm zur Erfassung der Kationenaustauschkapazität (KAK) gesiebt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die im Feld entnommenen 10 Lysimeter auf – 60 hPa vorentwässert, um einheitliche Messbedingungen zu gewährleisten. In Anlehnung an die praxisübliche Menge wurden 55,2 ml des jeweiligen Gärrestes bzw. des destillierten Wassers als Kontrolle auf die Oberfläche des Lysimeters gegeben. Die Durchführung der Probenvorbereitung erfolgte analog zur ersten Versuchsreihe.

2.4 Laboranalysen

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) wurde in vierfacher Wiederholung gemäß der DIN 19684 Part 1 (1977) im Atomabsorptionsspektrometer gemessen (SCHLICHTING et al., 2005).

Als Maß für den Anteil an dispergiertem Ton (RDC) wurde die Trübung einer Boden-Wasser-Suspension in Nephelometric Turbidity Units (NTU [g L^{-1}]) im Turbidimeter (2100AN IS, ISO 7027, Hach, USA) erfasst. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an den Versuchsaufbau von DEXTER et al. (2011). Drei bis vier g der feuchten Proben wurden in kalibrierte PE-Flaschen mit einem Volumen von 150 ml eingewogen und bis auf 125 ml (Boden + Wasser) mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Das Gemisch wurde 30 mal händisch geschüttelt. Nach einer Sedimentationszeit von 3 Stunden und 14 Minuten (gemäß

der Zeit für die Körnungsanalyse) wurden 30 ml des Aliquots mit einer Pipette in einer Tiefe von 2 cm entnommen, in Küvetten gefüllt und im Turbidimeter die Trübung in 6-facher Wiederholung erfasst. Parallel hierzu wurde der gravimetrische Wassergehalt durch Trocknung bei 105 °C ermittelt.

Die Trübung ist eine Funktion der Massenkonzentration der Trockenmasse der Bodenpartikel M_d (g), der Feuchtmasse M_m (g) sowie des gravimetrischen Wassergehaltes w (%) und kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$M_d = M_m / (1 + w) \quad (1)$$

Die Trübung wird um den Einfluss des Ausgangswassergehaltes und der spezifischen Trockenmasse normalisiert:

$$\text{Normalized turbidity} = \text{NTU} / (M_d [\text{g L}^{-1}]) \quad (2)$$

2.5 Statistik

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistiksoftware R (Version 2.15.3). Die Daten wurden aufgrund der grafischen Residuenanalyse als normalverteilt und heteroskedastisch angenommen. Mit der Varianzanalyse (ANOVA) wurden Mittelwertvergleiche zwischen den verschiedenen Standorten (KD und HS) sowie zwischen den Gärresten und der Kontrolle durchgeführt.

3 Ergebnisse

Die Gärreste aus Monofermentation wiesen einen höheren Anteil an Natrium im Vergleich zu den Gärresten aus Kofermentation auf (Tabelle 3). Dabei enthielt der Gärrest aus Mais (M100) den höchsten Gehalt an Natrium. Die Menge an austauschbarem Calcium dominierte die an der Kationenaustauschkapazität beteiligten Kationen, die Anteile waren in den Gärresten aus Kofermentation höher als in den Gärresten aus Monofermentation. Die maisdominie-

Tabelle 3: Anteile an austauschbare Kationen [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] in den Gärresten
Table 3: Content of exchangeable cations [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] contained in the digestates

Cation [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$]	M100	R100	R80M20	M80R20
Na	21,35	20,97	20,11	19,94
K	22,1	18,79	22,35	23,92
Mg	7,95	7,42	7,45	8,10
Ca	40,23	37,90	37,95	42,76

renden Gärreste (M100 und M80R20) wiesen dabei den höchsten Anteil an Ca auf.

Die Applikation der Gärreste auf den homogenisierten lehmigen Boden führte im Vergleich zur Kontrolle zu geringerem Anteil an dispergiertem Ton (Abbildung 1). Die Aufbringung der Gärreste auf den homogenisierten sandigen Boden ergab keine Veränderung des Anteils an RDC verglichen mit der Kontrolle. Insgesamt war die Menge an RDC in allen Varianten des sandigen Bodens signifikant geringer als im lehmigen Boden ($P < 0,05$).

Die Applikation der Gärreste auf die strukturierten Lysimeter führte im lehmigen Boden zu bis zu 20-fach höheren Anteilen an RDC im Vergleich zu den RDC-Gehalt im homogenisierten Boden unter Gärreteinfluss. Für den sandigen Boden lag der Anteil an RDC im homogenisierten und strukturierten Boden auf einem Niveau. Der Gärrest aus Mais (M100) induzierte eine Erhöhung des Anteils an RDC im Vergleich zur Kontrolle, während die Aufbringung

der Gärreste R100, R80M20 sowie M80R20 zu einer signifikanten ($P < 0,05$) Abnahme der Menge an RDC führte (Abbildung 2).

4 Diskussion

Dispergierende und aggregierende Prozesse im Boden werden hauptsächlich durch die Größe der Bodenpartikel (z. B. Textur), die Ladung von Tonmineralen, die Größe und Zugänglichkeit von Sorptionsflächen für austauschbare Kationen sowie die Menge und Wertigkeit der Kationen in der Bodenlösung und im Gärrest selber bestimmt (SÉQUARIS & LEWANDOWSKI, 2003). Die Applikation der Gärreste auf die Böden bewirkt unterschiedliche Reaktionen hinsichtlich der Dispergierung von Bodenpartikeln. Während der sandige Boden durch den Gärrest weitgehend unbeeinflusst bleibt und weder mit Dispergierung noch mit Aggregation re-

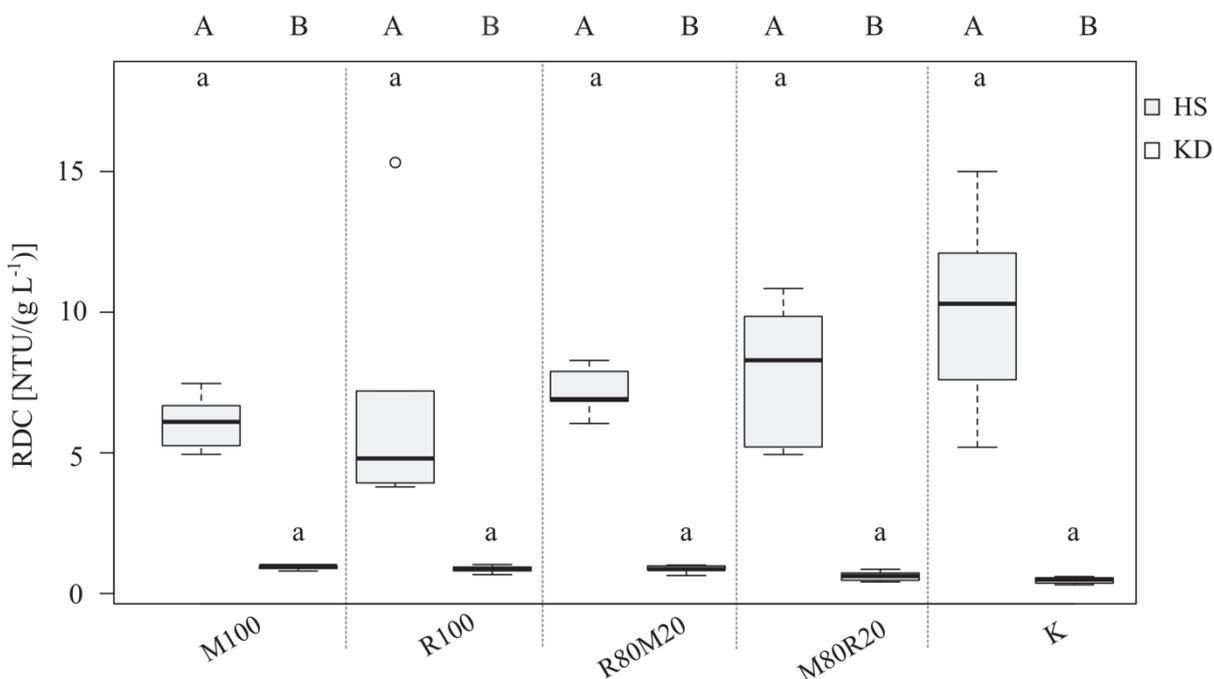


Abbildung 1: Anteil an dispergiertem Ton (RDC) [NTU] ($n = 6$) des A-Horizontes aus Hohenschulen (HS) (graue Boxen) und Karkendamm (KD) (weiße Boxen) nach Gärrestzufuhr auf den homogenisierten Boden im Vergleich zur Kontrolle. Unterschiedliche Buchstaben (AB) charakterisieren statistische Unterschiede ($P < 0,05$) der einzelnen Varianten zwischen den Standorten. Unterschiedliche Buchstaben (ab) charakterisieren statistische Unterschiede ($P < 0,05$) der Gärrestvarianten im Vergleich zur Kontrolle für den jeweiligen Standort. Die Boxen zeigen den Median und die 25/75-%-Perzentile, die Whisker die Ober- und Untergrenze der Messwerte. Die horizontalen Balken in den Boxen kennzeichnen die Mittelwerte

Figure 1: Readily dispersible clay (RDC) [NTU] ($n = 6$) of the A-horizon from Hohenschulen (HS) (gray boxes) and Karkendamm (KD) (white boxes) after the addition of anaerobic digestates to the homogenized soil. Different letters (AB) indicate statistically significant differences ($P < 0.05$) between the experimental fields and statistically significant differences between the digestates and the control (ab). Boxes represent values within the 25th to 75th %ile, the whiskers indicate the range and horizontal bars inside the boxes are the median values

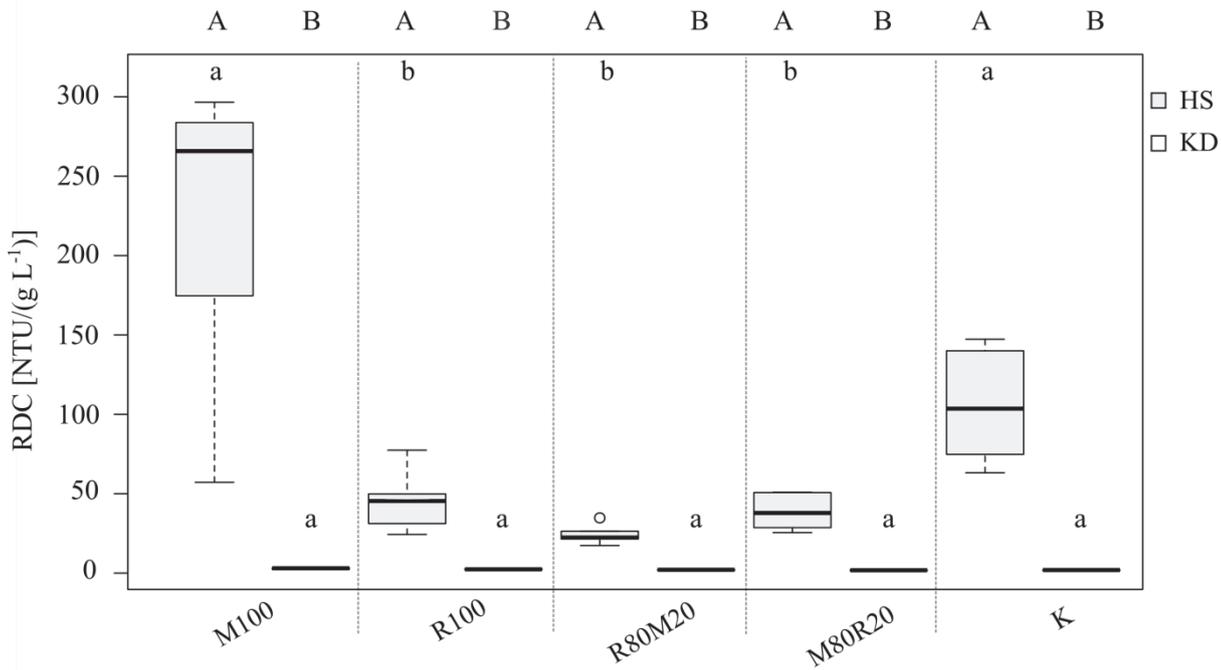


Abbildung 2: Anteil an dispergiertem Ton (RDC) [NTU] ($n = 6$) des A-Horizontes aus Hohenschulen (HS) (graue Boxen) und Karkendamm (KD) (weiße Boxen) nach Gärrestzufuhr auf den strukturierten Boden im Vergleich zur Kontrolle. Unterschiedliche Buchstaben (AB) charakterisieren statistische Unterschiede ($P < 0,05$) der einzelnen Varianten zwischen den Standorten. Unterschiedliche Buchstaben (ab) charakterisieren statistische Unterschiede ($P < 0,05$) der Gärrestvarianten im Vergleich zur Kontrolle für den jeweiligen Standort. Die Boxen zeigen den Median und die 25/75-%-Perzentile, die Whisker die Ober- und Untergrenze der Messwerte. Die horizontalen Balken in den Boxen kennzeichnen die Mittelwerte

Figure 2: Readily dispersible clay (RDC) [NTU] ($n = 6$) of the A-horizon from Hohenschulen (HS) (gray boxes) and Karkendamm (KD) (white boxes) after the addition of anaerobic digestates to the structured soil. Different letters (AB) indicate statistically significant differences ($P < 0.05$) between the experimental fields and statistically significant differences between the digestates and the control (ab). Boxes represent values within the 25th to 75th %ile, the whiskers indicate the range and horizontal bars inside the boxes are the median values

agiert, zeigt der lehmige Boden eine deutlich höherer Sensibilität gegenüber beiden Prozessen. Die ausgeprägtere Anfälligkeit des lehmigen Bodens gegenüber Dispergierung und Aggregation ist mit dem deutlich höheren Tongehalt zu erklären (CALERO et al., 2008), denn Tonpartikel weisen eine höhere spezifische Oberfläche auf als die Quarzpartikel im sandigen Boden. Durch die hohe spezifische Oberfläche des Tons steht ein großer Anteil reaktiver Bindungsstellen für die Aufnahme von Kationen und organischen Komponenten zur Verfügung (KAHLE et al., 2002), was wiederum bei sandigen Böden nicht von großer Bedeutung und Wirksamkeit ist. Dies wird auch durch die insgesamt vernachlässigbare Dispergierungsreaktion in dem untersuchten sandigen Substrat bzw. von vornherein nur schwach strukturierten Ae Horizont des Podsoles bestätigt. Bei der Betrachtung des unterschiedlichen Anteils an dispergiertem Ton im homogenisierten und strukturierten Boden unter Gärresteinfluss wird die hohe Bedeutung des Oberflächen-

effektes ersichtlich. In tonig/lehmigen Substraten bzw. Bodenhorizonten tritt der Dispergierungseffekt hingegen deutlicher in Erscheinung. Stärkere Dispergierungsvorgänge (ein höherer Anteil an dispergiertem Ton) treten mit zunehmender Strukturierung des Bodens auf. Als Folge der Homogenisierung ist eine vollständige Zugänglichkeit der spezifischen Oberfläche der Bodenpartikel für Kationen und organische Komponenten im Gärrest gegeben. Aufgrund der Größe der spezifischen Oberfläche ist jedoch die praxisübliche Gärrestmenge ($30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) nicht ausreichend, um die Vielzahl an reaktiven Bindungsstellen auf der Partikeloberfläche zu besetzen. Damit ist auch der Wertigkeits- bzw. Konzentrationseffekt bei dem Austauschvorgang bei der gewählten Menge an Gärresten nicht stark ausgeprägt. Aufgrund der unzureichenden Besetzung dieser Bindungsstellen durch monovalente Kationen können diese ihre dispergierende Wirkung nicht vollständig entfalten, wie anhand des geringeren Anteils an dispergiertem Ton (RDC)

im homogenisierten verglichen mit dem strukturierten Boden belegt werden kann. Die Ergebnisse zeigen allerdings weiterhin, dass der RDC-Gehalt im homogenisierten lehmigen/tonigen Boden nach Applikation der Gärreste aus Kofermentation höher ist als nach der Aufbringung von Gärresten aus Monofermentation. Dieses auf den ersten Blick eigenartige Ergebnis lässt sich mit der höheren Menge an freien Fettsäuren und Lipiden in den Gärresten aus Monofermentation (Daten nicht gezeigt) erklären, wodurch ein Teil der reaktiven Bindungsstellen nach Infiltration der Gärreste in den Boden bereits von derartigen Substanzen besetzt worden sind und damit für die Adsorption von monovalenten Kationen nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Konsequenz ist eine verringerte Wirksamkeit der im Gärrest enthaltenen monovalenten Kationen, wenn Gärreste aus Monofermentation appliziert werden. Nach Applikation der Gärreste aus Kofermentation steht vermutlich ein höherer Anteil an Bindungsplätzen für monovalente Kationen zur Verfügung, was sich in höheren RDC-Gehalten widerspiegelt. Diese an homogenisiertem Material erzielten Ergebnisse werden durch eine Aggregation und damit einhergehende Verringerung der tatsächlich für chemische Austauschprozesse erreichbaren Reaktionsplätze deutlich modifiziert. Es ist bekannt, dass die Kationenaustauschintensität je nach Gefügeform deutlich kleinere Werte als die KAK aufweist, was mit einer Reduktion der Zugänglichkeit bzw. Erreichbarkeit der Austauscherplätze erklärt werden kann (HARTMANN, 1998). Damit kommt es zu einer deutlich stärkeren Konkurrenz um diese erreichbaren Austauscherplätze und der Anteil der mit dem Gärrest zugeführten Kationen reicht bereits aus, um eine Vielzahl der Bindungsstellen zu besetzen und damit je nach Wertigkeit und Hydrathüllengröße auch die Stabilität des Bodens herabzusetzen. Dass dieser Prozess im strukturierten, feinkörnigen Boden entsprechend abläuft, belegen die hohen Anteile an RDC im strukturierten Boden. Dabei fällt weiterhin auf, dass die Applikation des Gärrestes aus Mais zu einer ausgeprägten Dispergierung im strukturierten, lehmigen Boden führt, während der Einsatz der übrigen Gärreste sowohl aus der Mono- als auch Kofermentation die Flockung von Bodenpartikeln sogar fördert. Obwohl, wie in Tabelle 3 zusammengestellt, auch in den Maisgärresten nennenswerte Ca Konzentrationen vorliegen, was lehrbuchmäßig eigentlich als stabilisierend eingestuft werden kann (HARTGE & HORN, 2014), muss der hohe Anteil an Natrium im Gärrest aus Mais für die Dispergierung von Bodenpartikeln und eine Schwächung der Aggregate verantwortlich gemacht werden (HURISSO et al., 2013). Als monovalentes Kation weist Na-

trium einen kleinen Ionenradius auf und ist daher von einer großen Hydrathülle umgeben. Die Zufuhr von Natriumionen beeinflusst daher die Mächtigkeit der diffusen Doppelschicht von Tonpartikeln gemäß der Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek-Theorie (SÉQUARIS et al., 2013). Aufgrund der großen Mächtigkeit dieser diffusen Doppelschicht, führt die Annäherung von zwei benachbarten Partikel nicht zur Überwindung der abstoßenden Kräfte, sodass keine Aggregation erfolgen bzw. vorhandene Aggregate zerstört werden (LEVY et al., 2003), zumal damit die abstoßenden Kräfte über die anziehenden van-der-Waals-Kräfte dominieren (NGUYEN et al., 2013). Die im Gärrest vorhandenen polyvalenten Kationen, z. B. Calcium, können hingegen bei einer geringmächtigen Hydrathülle die zwischen den Partikeln wirksamen abstoßenden Kräfte überwinden und diese aggregieren (s. hierzu auch die Gouy-Chapman's Theorie, modifiziert in STERN (1924)) (MITCHELL & SOGA, 2005). Die Zufuhr von Calcium resultiert daher aufgrund des geringeren Hydratisierungsgrades eher in Aggregation als Natrium. Wenn davon ausgegangen wird, dass Calcium bevorzugt und fester gebunden wird als Natrium, verwundert es, dass das Natrium im Gärrest aus Mais dispergierend wirkt. Es wäre vielmehr erwartungsgemäß, dass aufgrund des hohen Calciumgehaltes eine Aggregation stattfindet. Dieses kann wie folgt erklärt werden: Nach Applikation des Gärrestes aus Mais führen die Natriumionen zur Dispergierung von Partikeln, die sich in tieferen Bodenschichten akkumulieren. Größere Partikel dominieren somit in den geschwächten Aggregaten. Zusätzlich zu den Kationen wird dem Boden mit dem Gärrest Phosphor zugeführt, das eine hohe Affinität zu Calciumionen aufweist. Durch die Bindung wird das Calcium unwirksam, um die Bodenpartikel zu aggregieren (Abbildung 3).

Da bei den übrigen Gärresten weniger Natrium enthalten ist, werden keine Dispergierungsprozesse induziert. Als Folge bleiben die Aggregate intakt und durch die vorhandenen Tonpartikel verdichtet. Feinere Poren überwiegen, die Wasserhaltekapazität ist erhöht und anoxische Bedingungen treten im Aggregat auf. Durch den fehlenden Sauerstoff diffundiert Eisen an die Außenhülle des Aggregates, wo es ausfällt und sich mit dem Phosphor der Gärreste verbindet. Als Folge bleiben die Calciumionen ungebunden und können zwischen den Tonpartikeln aggregierend wirken (Abbildung 4).

Um die permanente negative Ladung von Tonteilchen zu kompensieren, werden austauschbare Kationen adsorbiert, um einen elektrischen Ausgleich zu erzielen. Die adsorbierten Kationen bilden einen diffusen Ionenschwarm, dessen

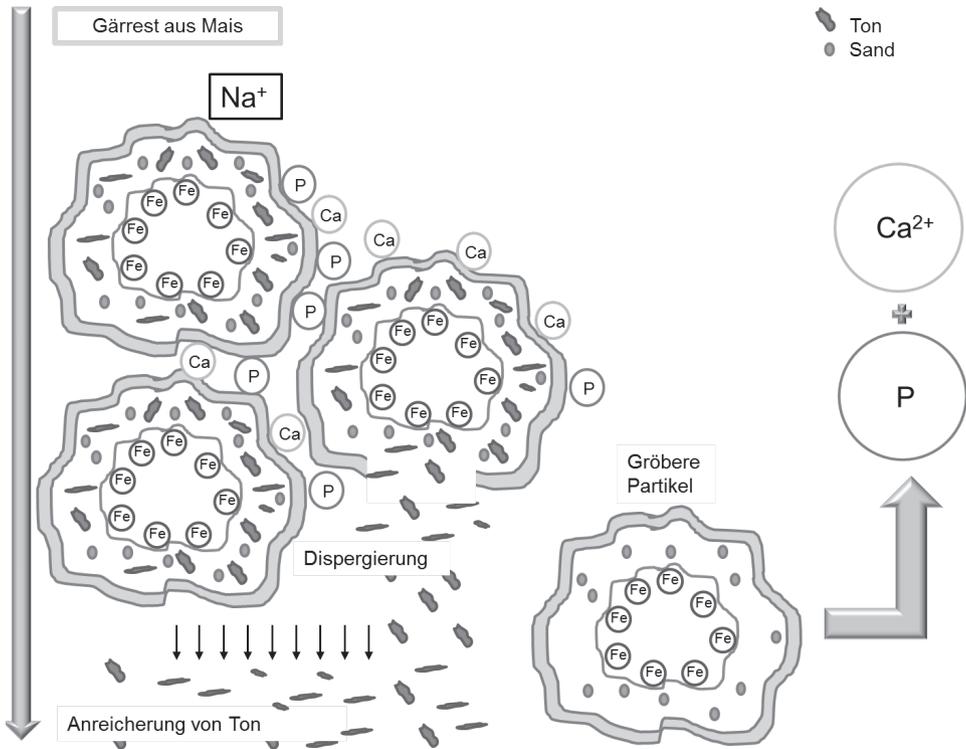


Abbildung 3: Schematischer Ablauf der Dispergierung im Boden nach der Applikation von Gärresten aus Mais
 Figure 3: Process of soil dispersion as a consequence of the application of digestate derived from maize silage

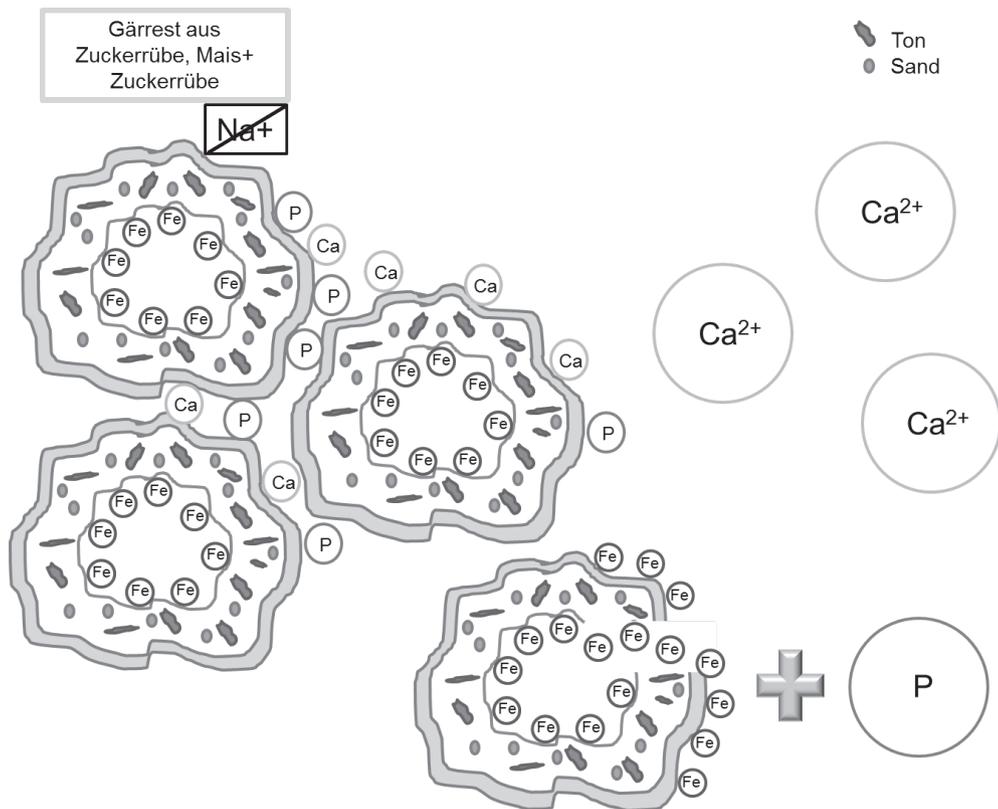


Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Aggregation im Boden nach der Applikation von Gärresten aus Zuckerrübe und Zuckerrübe und Mais in Kofermentation
 Figure 4: Process of soil aggregation as a consequence of the application of digestate derived from sugar beet and sugar beet and maize from co-fermentation

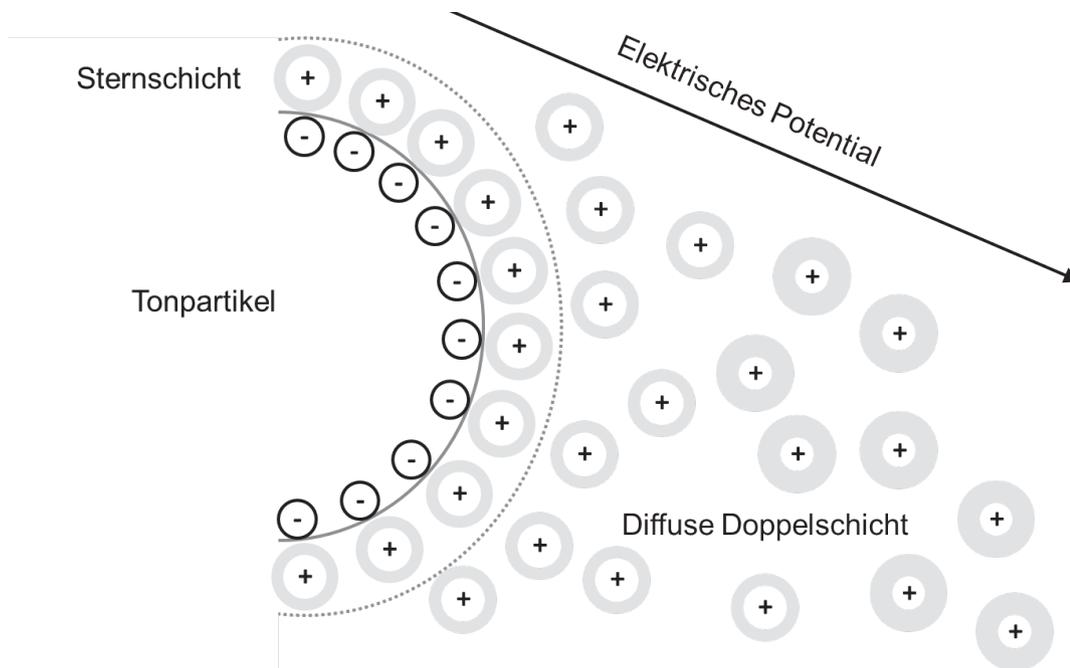


Abbildung 5: Schema der Gouy-Chapman's Theorie der diffusen Doppelschicht nach Stern (1924) und die Verteilung von Kationen um einen negativ geladenen Tonpartikel

Figure 5: Scheme of the diffuse double layer theory of Gouy-Chapman by Stern (1924) and distribution of cations around a negatively charged clay mineral

Kationenkonzentration mit zunehmender Entfernung von der Partikeloberfläche abnimmt (Abbildung 5).

An der Oberfläche des Tonpartikels sind die Kationen besonders stark in der Sternschicht gebunden (LIANG et al., 2007). Die diffuse Schicht enthält schwächer gebundene Kationen. Während die Kationen in der diffusen Schicht vollständig hydratisiert sind, sind die Kationen der Sternschicht teilweise dehydratisiert. Daher werden bevorzugt polyvalente Kationen in der Sternschicht gebunden, während das einwertige Natrium vorwiegend in der diffusen Schicht vorliegt (SPOSITO, 2008). Die ein Tonpartikel ummantelnde diffuse Doppelschicht bildet ein elektrisches Feld, das durch ein elektrisches Potential beschrieben werden kann. Höhe und Verlauf dieses Potentials bestimmt die Interaktion zwischen den Partikeln und folglich Dispergierung und Aggregation (KOSMULSKI et al., 2009). Aus der Basis dieser Theorie bestimmt also die Mächtigkeit der Hydrathülle als Funktion des Ionenradius Dispergierungs- oder Aggregierungsvorgänge von Tonpartikeln (ROTH & PAVAN, 1991).

5 Schlussfolgerung

Die Menge an Tonpartikeln bestimmt maßgeblich die Anfälligkeit eines Bodens gegenüber Dispergierung, daher ist dieser Prozess in sandigen Böden zu vernachlässigen. Im Gärrest enthaltene Natriumionen sind hier der ausschlaggebende Faktor, um eine Dispergierung hervorzurufen und dieser Prozess fällt umso stärker aus, je mehr monovalente Kationen im Verhältnis zur spezifischen Oberfläche des Bodens wirksam werden können. Dabei ist auch die selektive Sorption von Ca an Phosphaten und damit die verhinderte Brückenbindung zwischen Tonmineralen zu berücksichtigen. Generell gilt damit aber auch, dass stark aggregierte und strukturierte Böden anfälliger für Dispergierung sind als homogenisierte und damit generell labilere Böden. In weiteren Untersuchungen sollte für ein umfassenderes Verständnis des ablaufenden selektiven Austausches – und Fällungsprozessen zwischen Calcium, Phosphat und durch Natrium als Erklärung für Dispergierung u. a. anhand des Selektivitätskoeffizienten mittels der Gapon-Gleichung erfasst werden.

Danksagung

Die Autoren danken der FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe) für die finanzielle Unterstützung, Prof. Dr. E. Hartung und Dr. S. Ohl, Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Universität Kiel, für die Bereitstellung der Gärreste.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland, 5. Aufl., Hannover.
- ALBURQUERQUE, J. A., C. DE LA FUENTE, M. CAMPOY, L. CARRASCO, I. NÁJERA, C. BAIXAULI, F. CARAVACA, A. ROLDÁN, J. CEGARRA, & M. P. BERNAL (2012): Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *Europ. J. Agron.* 43, 119–128.
- ÁLVAREZ, J. A., L. OTERO & J. M. LEMA (2010): A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresour. Technol.* 101, 1153–1158.
- APARICIO, I., J. L. SANTOS & E. ALONSO (2009): Limitation of the concentration of organic pollutants in sewage sludge for agricultural purposes: A case study in South Spain. *Waste Manage.* 29, 1747–1753.
- BRONICK, C. J. & R. LAL (2005): Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.
- CALERO, N., V. BARRÓN & J. TORRENT (2008): Water dispersible clay in calcareous soils of southwestern Spain. *Catena* 74, 22–30.
- CZYŻ, E. A., A. R. DEXTER & H. TERELAK (2002): Content of readily-dispersible clay in the arable layer of some Polish soils. *Catena Verlag, Reiskirchen.*
- DEXTER, A. R., G. RICHARD, E. A. CZYŻ, J. DAVY, M. HARDY, O. DUVAL (2011): Clay Dispersion from Soil as a Function of Antecedent Water Potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 444–455.
- DIN 19684 TEIL 1 (1977): Chemische Laboruntersuchungen, Bestimmung des pH-Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs. Berlin, Köln.
- GERICKE, D., A. PACHOLSKI, H. KAGE (2007): NH₃-Emissionen bei der ackerbaulichen Nutzung von Gärrückständen aus Biogasanlagen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 19, 1–2.
- HARTGE, K. H., R. HORN (2014): Einführung in die Bodenphysik. 4. überarbeitete Auflage, Schweizerbarthsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HARTMANN, A., W. GRÄSLE & R. HORN (1998): Cation exchange processes in structured soils at various hydraulic properties. *Soil Till. Res.* 47, 67–72.
- HURISSO, T. T., J. G. DAVIS, J. E. BRUMMER, M. E. STROMBERGER, M. M. MIKHA, M. L. HADDIX, M. R. BOOHER, E.A. PAUL (2013): Rapid changes in microbial biomass and aggregate size distribution in response to changes in organic matter management in grass pasture. *Geoderma* 193, 68–75.
- KAHLE, M., M. KLEBER & R. JAHN (2002): Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 639–644.
- KOSMULSKI, M. (2009): pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach. *J Colloid Interface Sci.* 337, 439–448.
- LEVY, G. J., A. I. MAMEDOV & D. GOLDSTEIN (2003): Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. *Soil Sci.* 168, 552–562.
- LIANG, Y., N. HILAL, R. LANGSTON, V. STAROV (2007): Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment. *Adv. Colloid Interface Sci.* 134–135, 151–166.
- MITCHELL, J. K. & K. SOGA (2005): Fundamentals of soil behavior. 3rd edition. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 577pp.
- NGUYEN, M. N., S. DULTZ, T. T. T. TRAN, A. T. K. BUI (2013): Effect of anions on dispersion of a kaolinitic soil clay: A combined study of dynamic light scattering and test tube experiments. *Geoderma* 209, 209–213.
- ODLARE, M., V. ARTHURSON, M. PELL, K. SVENSSON, E. NEHRENHEIM & J. ABUBAKER (2011): Land application of organic waste – Effects on the soil ecosystem. *Appl. Energ.* 88, 2210–2218.
- SCHLICHTING, E., H. P. BLUME & K. STAHR (1995): Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler. 2nd, revised edition ed. Vol. 81. Berlin, Wien: Blackwell-Wissenschafts-Verlag.
- ROTH, C. H. & M. A. PAVAN (1991): Effects of Lime and Gypsum on Clay Dispersion and Infiltration in Samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma*, 48, 351–361.
- SÉQUARIS, J. M., E. KLUMPP & H. VERECKEN (2013): Colloidal properties and potential release of water-dispersible

le colloids in an agricultural soil depth profile. *Geoderma* 193, 94–101.

SÉQUARIS, J. M. & H. LEWANDOWSKI (2003): Physicochemical characterization of potential colloids from agricultural topsoils. *Colloid Surface A* 217, 93–99.

SHAW, J. N., D. W. REEVES & C. C. TRUMAN (2003): Clay mineralogy and dispersibility of soil and sediment derived from rhodic paleudults. *Soil Sci.* 168, 209–217.

SPOSITO, G. (2008): *The chemistry of soils*. 2nd edition. Oxford Univ. Press, New York, 329 pp.

TAVARES FILHO, J., G. M. D. BARBOSA & A. A. RIBON (2010): Water-Dispersible Clay in Soils Treated with Sewage Sludge. *Rev Bras Cienc Solo* 34, 1527–1534.

STERN, O. (1924): Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 30, 508–516.

Anschrift der Autoren

A. Voelkner und R. Horn, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, 24118 Kiel
Amrei.Voelkner@Eurochemagro.com
rhorn@soils.uni-kiel.de