

Anhang 2, Teil 2

Kompost-Abschlussbericht 2008

Punkt C 2.2.2.1 Bodenphysikalische Untersuchungen

Ausführlicher Ergebnisbericht

Autor: Dr. Berthold Deller

1 Methodik und Durchführung der Untersuchungen

Zur Feststellung der Kompostwirkung auf bodenphysikalische Eigenschaften wurden Parameter der Bodenstruktur (Aggregatstabilität, Lagerungsdichte, Porenanteil) sowie des Wasser- und Lufthaushaltes (Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, Wasserdurchlässigkeit (kf-Wert), Wassergehalt und Wasserkapazität) herangezogen. Zum Einsatz kamen dabei überwiegend standardisierte Bestimmungsverfahren (vgl. Abschlussbericht Punkt B 3.3.2, Tabelle 6).

Alle Untersuchungen erfolgten im Labor, zumeist an ungestörten, feldfeuchten Stechzylinderproben (100 cm³) mit Ausnahme der Aggregatstabilität und der Wasserkapazität, die an lufttrockenem, homogenisiertem Material <2 mm von Mischproben ermittelt wurden.

Für die genannten Untersuchungen wurden die Versuchsvarianten V3 - ohne Kompost, V9 - jährlich 10 t/ha TM und V12 - jährlich 20 t/ha TM herangezogen., um mögliche Komposteffekte bei maximal erlaubter bzw. zu Forschungszwecken bei doppelter Ausbringungsmenge feststellen zu können.

Die Probenahme erfolgte an drei Versuchen (Forchheim, Stockach und Heidenheim) im Sommer 2006 nach Versuchsabschluss (Termine: Stockach - 20.07.06., Heidenheim - 26.07.06., Forchheim - 02.09.06.).

Dabei wurden aus den ausgewählten Versuchsvarianten je Wiederholung jeweils 12 Stechzylinder aus 10 - 15 cm Tiefe und jeweils eine Mischprobe aus 0 - 10 cm Tiefe entnommen. Der Probenahmezeitpunkt lag an allen Standorten nach der Ernte von Wintergerste und damit fast ein Jahr nach der letzten, an allen Standorten gleichen Bodenbearbeitung (Pflugfurche mit anschließender Saatbettbereitung). Die Böden waren also zu diesem Zeitpunkt gut abgesetzt und Unterschiede in der Bodenbearbeitung waren bei der Interpretation der nachfolgenden Ergebnisse nicht zu berücksichtigen.

2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen berichtet. Dabei ist jeweils die Anzahl an Bestimmungen, die je Variante durchgeführt wurden (= Anzahl an Ergebnissen, n), ihr Mittelwert (MW) und ihre Standardabweichung (s) aufgeführt. Die Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen nach dem t-Test wird durch folgende Symbole angezeigt:

ns - Irrtumswahrscheinlichkeit (α) ≥ 5 %, * - $\alpha < 5$ %, ** - $\alpha < 1$ %, *** - $\alpha < 0,1$ %. In den Fällen, in denen die Signifikanzgrenze nicht erreicht wurde, Unterschiede jedoch wahrscheinlich sind ($\alpha < 20$ %), wird zusätzlich in Klammern die Irrtumswahrscheinlichkeit angegeben.

Zum besseren Verständnis der nachfolgend aufgeführten Ergebnisse sind zunächst in Tabelle 1 Merkmale der Bodentextur in der Krume (Ap) der Versuchsstandorte aufgeführt. Sie stammen aus früheren Untersuchungen [1, 2].

Tabelle 1: Gehalte an Ton, Schluff und Sand in der Krume der untersuchten Böden sowie davon abgeleitete Bodenarten nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5 [3])

Standort	Gehalte [%] an			Bodenart
	Ton, < 2 µm	Schluff, 2 - 63 µm	Sand, 0,06 - 2 mm	
Forchheim	6	21	73	Sl2
Stockach	35	35	30	Lt2-Lt3
Heidenheim	27	62	11	Lu

2.1 Parameter der Bodenstruktur

2.1.1 Trockenrohdichte (pt) [g/cm³], n = 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	1,51	0,04	1,44	0,07	1,29	0,13
V9	1,45	0,07	1,32	0,09	1,27	0,10
V12	1,42	0,05	1,29	0,12	1,30	0,13
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	***	***	***	***	ns	ns
V9		*		ns (14,8)		ns

An den Standorten Forchheim und Stockach fällt die Trockenrohdichte mit steigendem Komposteinsatz, wobei auch die Differenz zwischen V9 und V12 am erstgenannten noch statistisch gesichert ist. Der Komposteinsatz bewirkt hier also eine Lockerung des Bodens, d.h. eine Erniedrigung des Anteils an Festmaterial je Volumeneinheit Boden. Am Standort Heidenheim lagert der Boden in der unbehandelten Variante (V3) deutlich lockerer und wird durch den Komposteinsatz dann auch nicht mehr signifikant verändert.

Die Trockenrohdichte von Böden wird durch Unterschiede im Tongehalt wesentlich beeinflusst. Berücksichtigt man dies (siehe [3]), ergibt sich für die untersuchten Böden folgende Einstufung der effektiven Lagerungsdichte: Forchheim LD2 (niedrig, nur von V3 geringfügig überschritten), Stockach LD3 (mittel), Heidenheim: LD2 (niedrig).

2.1.2 Porenanteil (PA) [%], n = 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	42,0	1,5	44,8	2,9	51,3	4,7
V9	44,2	2,9	49,2	3,4	51,9	3,9
V12	45,1	1,8	50,2	4,6	50,7	4,8
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	***	***	***	***	ns	ns
V9		ns (12,3)		ns		ns

Der (gesamte) Porenanteil verhält sich reziprok zur Trockenrohdichte. Deshalb ist er am Standort Heidenheim mit durchweg über 50 % am höchsten, gefolgt von Stockach und Forchheim. Kompost (V9 und V12) führt nur an den beiden letztgenannten Standorten zu einer sehr hoch signifikanten Erhöhung gegenüber der unbehandelten Variante. In Forchheim beträgt sie 2,2 bzw. 3,1 %, in Stockach 4,4 bzw. 5,4 %. Die tendenziell vorhandene Wirkung höherer Gaben (V12) gegenüber der regulären Anwendung (V9) ist in keinem Fall statistisch gesichert.

Das Ausbleiben der Kompostwirkung am Standort Heidenheim erscheint angesichts des bereits ohne Behandlung relativ hohen Porenanteils plausibel.

2.1.4 Aggregatstabilität (AS1), Anteil der stabilen Bodenaggregate im Probenmaterial der Größe 1 - 2 mm ohne die Sandfraktion > 0,25 mm [%], n = 12 (1 Probe von jeder der 4 Wiederholungen im Versuch, 3 Bestimmungen je Probe)

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	65,6	5,4	34,4	1,8	22,3	2,9
V9	64,6	5,3	33,6	3,6	26,8	5,3
V12	65,3	3,1	34,6	3,6	28,7	4,4
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	ns	ns	ns	*	**
V9		ns		ns		ns

Den aufgeführten Ergebnissen zufolge weist der Boden am Standort Forchheim die höchste Aggregatstabilität auf. Dies ist zunächst schwer verständlich, da es sich um einen schwach lehmigen Sandboden handelt (vgl. Tabelle 1). In solchen Böden fehlen Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge, so dass sich kein Aggregatgefüge, zumindest kein Meso- und Makrogefüge, ausbilden kann. In der hier angewandten Methode werden allerdings kleinere Partikel (Durchmesser 1 - 2 mm) für die Bestimmung der Aggregatstabilität verwendet. Sie werden im jeweils untersuchten Boden entweder durch Zerkleinerung größerer Aggregate geschaffen und/oder sind schon ursprünglich vorhanden, wie es vom Boden Forchheim anzunehmen ist.

Bei der Plausibilisierung der Ergebnisse ist zunächst die Bezugsbasis zu berücksichtigen. Nach DIN 19683-16 wird nämlich die Menge (Masse) der stabilen Aggregate nicht auf die gesamte Bodeneinwaage bezogen sondern nur auf die Massensumme stabiler und instabiler Aggregate. Sandpartikel > 0,25 mm, die in der Fraktion 1 - 2 mm ggf. enthalten sind, werden dabei ausgeschlossen. Beim Boden Forchheim beträgt ihr Anteil jedoch etwa 2/3 der Gesamtmenge, die für die Bestimmung verwendet wird, so dass die Basis, auf welche die Masse der stabilen Aggregate bezogen wird, wesentlich kleiner ist als bei den lehmigen Böden Stockach und Heidenheim, wo der Anteil an Sand > 0,25 mm deutlich unter 10 % liegt. Mit anderen Worten: Definiert man die Aggregatstabilität anders, nämlich als Anteil stabiler Aggregate am *Gesamtmaterial* der Größe 1-2 mm, ergeben sich grundlegend andere, realistischere Beurteilungsmaßstäbe. Die entsprechenden Werte (AS2) sind daher in der nachfolgenden Tabelle zusätzlich aufgeführt.

Aggregatstabilität 2 (AS2), Anteil stabiler Bodenaggregate im Probenmaterial der Größe 1 - 2 mm, bezogen auf die gesamte für die Bestimmung verwendete Bodeneinwaage [%], n = 12 (1 Probe von jeder der 4 Wiederholungen im Versuch, 3 Bestimmungen je Probe)

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	22,2	2,9	32,8	1,7	21,2	2,8
V9	23,9	5,1	32,0	3,4	25,6	5,2
V12	23,1	5,7	32,7	3,6	27,2	4,2
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	ns	ns	ns	*	*
V9		ns		ns		ns

Ob allerdings der Sandboden in Forchheim nahezu den gleichen Anteil stabiler Aggregate haben kann wie der schluffige Lehm am Standort Heidenheim, bleibt zu hinterfragen.

Dabei ist zunächst zu überlegen, welche Substanzen zur Aggregatbildung beitragen. In Lehm- und Tonböden ist es die Bodenmatrix selbst durch Zusammenlagerung von Tonpartikeln und zusätzlich die Verknüpfung durch Humusbestandteile. Hinzu kommen ggf. Kittsubstanzen wie Carbonate und Eisenoxide. Tonpartikel sind im Boden Forchheim nur in geringen Anteilen vorhanden, Carbonate nicht. Dagegen könnten Podsolierungsprozesse, die auf diesem Standort in der Vergangenheit wahrscheinlich stattgefunden haben, noch Eisenoxide in höherer Konzentration hinterlassen haben. Andererseits ist der Humusgehalt des Bodens Forchheim nicht wesentlich verschieden von dem der beiden anderen Standorte. Insofern sollte man der organischen Substanz grundsätzlich auch keine höhere stabilisierende Wirkung auf die Bodenaggregate beimessen. Allerdings ist zu bedenken, dass sich Dauerhumus vor allem in Ton-Humuskomplexen anreichert. Ist der Tongehalt niedrig (wie in Forchheim), konzentriert sich bei gleichem Gehalt (bezogen auf die Fraktion $< 2 \text{ mm}$) der Humus in diesen Komplexen deutlich mehr als in feinkörnigeren Böden. Dann kann man ihm aber auch eine größere Wirkung auf die Stabilität dieser Komplexe (Aggregate) als in anderen Böden beimessen, womit die überraschend große Aggregatstabilität, die für den Boden Forchheim festgestellt wurde, zumindest ansatzweise erklärbar wäre.

Akzeptiert man diese Argumente, lässt sich auch erklären, warum nur am Standort Heidenheim eine statistisch gesicherte Kompostwirkung auf die Aggregatstabilität festzustellen ist. Der Boden dieses Standortes weist die geringste Trockenrohdichte (bzw. den höchsten Porenanteil) und mit über 60 % den höchsten Schluffanteil (vgl. Tabelle 1) auf. Er lagert also relativ locker und Schluffe werden generell als Bodenkomponenten mit geringer Stabilität gegen Wassereinwirkung angesehen. Diese wird durch den Komposteinsatz verbessert, wobei allerdings die Erhöhung der Kompostgabe auf jährlich 10 t/ha keine zusätzliche Wirkung bringt. Am Standort Forchheim wird die Aggregatstabilität dagegen nicht erhöht, möglicherweise weil sich aus dem Kompost im Vergleich zur Ausgangssituation noch nicht genügend zusätzliche Ton-Humus-Komplexe gebildet haben. Der Boden am Standort Stockach schließlich lagert dichter, ist also mechanisch mehr verfestigt als der in Heidenheim und hat ihm gegenüber nur etwa die Hälfte an Schluff sowie höhere Tongehalte aufzuweisen. Dies erklärt, weshalb die Eigenstabilität der Bodenaggregate höher und der Komposteffekt an diesem Standort gering, jedenfalls statistisch nicht gesichert ist.

2.2 Parameter des Wasser- und Lufthaushaltes

An Kennwerten des Wasser- und Lufthaushaltes sind im Folgenden die Feldkapazität (FK und nutzbare FK - nFK), der Anteil an Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser am permanenten Welkepunkt, pF 4,2), die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Luftkapazität (LK), der Wassergehalt und die Wasserleitfähigkeit (kf) aufgeführt.

Bei FK, nFK und LK wird dabei jeweils zwischen zwei möglichen Zuständen unterschieden. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass zwar nach DIN 4220 das langsam bewegliche Wasser, das in den engen Grobporen (Porenäquivalent $> 10 \text{ bis } 50 \mu\text{m}$) gespeichert ist, zur FK bzw. nFK gerechnet wird, diese Annahme offensichtlich jedoch nicht auf alle Standorte zutrifft. In gut wasserzügigen Böden, z.B. Sand- und Schluffböden, mit großem Abstand vom Grundwasser, so auch an den hier beschriebenen Standorten Forchheim und Heidenheim, scheint dies nicht der Fall zu sein. So lag z.B. der Wassergehalt bei der Probenahme am Standort Forchheim, die nach ausgiebigen Niederschlägen im Sommer 2006 erfolgte, deut-

lich unter der oben definierten FK, stimmte jedoch mit dem Wassergehalt bei pF 2,5 sehr gut überein (Ergebnisse nicht aufgeführt). Deshalb werden die o.g. Parameter zweifach berichtet, einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung des in den engen Grobporen gespeicherten Wassers. Wie nachfolgend belegt wird, ist dies für die Erfassung der Kompostwirkung nicht entscheidend, wohl aber für die absolute Menge an Wasser, die den Pflanzen zur Verfügung steht und den Anteil an Poren, der dem Luftaustausch zwischen Boden und Atmosphäre dient.

2.2.1 Feldkapazität 1 (FK1, maximale Feldkapazität, Volumenanteil der bei einer Saugspannung von 63 hPa = pF 1,8 mit Wasser gefüllten Bodenporen) [%], n = 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	20,1	1,3	31,0	1,7	33,0	1,5
V9	21,6	1,8	30,6	1,8	34,3	1,2
V12	22,5	2,2	31,1	2,3	34,8	1,6
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	***	***	ns	ns	***	***
V9		ns (7,1)		ns		ns (14,3)

FK1 ist, bedingt durch die unterschiedliche Textur, an den Standorten Stockach und Heidenheim in der Variante ohne Kompost (V3) um ca. 11 % bzw. 13 % höher als am Standort Forchheim. Hier nimmt sie allerdings durch den Komposteinsatz um 1,5 % (V9) bzw. 2,4 % (V12) statistisch hoch signifikant zu. Mit 1,3 bzw. 1,8 % ist der Anstieg am Standort Heidenheim zwar geringer, jedoch ebenfalls statistisch sehr gut gesichert. Keine diesbezügliche Auswirkung ist am Standort Stockach zu erkennen. Die Wirkung der erhöhten gegenüber der normalen Kompostgabe ist in keinem Fall signifikant, jedoch an den Standorten Forchheim ($\alpha = 7\%$) und Heidenheim ($\alpha = 14\%$) wahrscheinlich vorhanden.

2.2.2 Feldkapazität 2 (FK2, minimale FK, Volumenanteil der bei einer Saugspannung von 300 hPa = pF 2,5 mit Wasser gefüllten Bodenporen) [%], n = 16

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	15,5	0,9	28,3	1,4	29,6	1,6
V9	16,8	1,5	27,7	2,0	30,6	1,1
V12	17,9	2,1	28,1	2,8	31,8	1,8
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	**	***	ns	ns	*	***
V9		ns (10,0)		ns		*

FK2 sinkt am Standort Forchheim in Variante V3 gegenüber FK1 mit 4,6 % am deutlichsten ab, an den beiden anderen Standorten mit 2,7 % (Stockach) bzw. 3,4 % (Heidenheim) weniger stark. Der Boden am Standort Forchheim enthält also den höchsten Anteil an engen Grobporen, was mit seiner Textur in Einklang steht.

Die Kompostwirkung kommt zwar in ähnlicher Weise wie bei FK1 zum Ausdruck, jedoch nicht immer in gleicher Höhe und mit gleicher Güte der statistischen Absicherung. Bemerkenswert ist, dass nun der erhöhten Kompostgabe am Standort Heidenheim berechtigterweise gegenüber V9 eine weiter steigende Wirkung attestiert werden kann.

2.2.3 Totwasser (Volumenanteil der bei einer Saugspannung von 1,5 MPa = pF 4,2 mit Wasser gefüllten Bodenporen) [%], n = 16

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	6,0	0,5	15,4	1,9	15,5	3,1
V9	6,2	0,7	14,5	2,4	15,5	1,4
V12	6,6	1,1	14,7	2,2	16,9	2,4
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	*	ns	ns	ns	ns (15,3)
V9		ns		ns		*

Wie aus der Textur (vgl. Tabelle 1) nicht anders zu erwarten, ist der Anteil an Totwasser am Standort Forchheim sehr niedrig, an den beiden anderen Standorten etwa um 8 bis 10 % höher, wobei zwischen ihnen nur geringe Unterschiede auftreten.

Kompost führt in den Böden Forchheim und Heidenheim - zumindest teilweise - zu einer geringen, jedoch signifikanten Erhöhung des Anteils an Totwasser. Es lässt sich damit erklären, dass aus dem Kompost fallweise kolloidale Substanzen gebildet und in die Böden eingebaut werden, die das Wasser sehr fest binden.

2.2.4 Nutzbare Feldkapazität 1 (nFK1, maximale nFK, Differenz der Volumenanteile an Wasser bei pF 1,8 und pF 4,2) [%], n = 16

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	13,7	1,0	15,5	2,3	17,6	2,9
V9	14,7	0,9	15,6	0,9	18,7	1,3
V12	15,2	1,0	15,9	1,0	17,6	1,9
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	**	***	ns	ns	ns (15,5)	ns
V9		ns (15,2)		ns		ns (6,7)

Die nutzbare Feldkapazität als Differenz zwischen der Feldkapazität und dem Anteil an Totwasser liegt (erwartungsgemäß) am Standort Forchheim am niedrigsten und steigt (V3) in der Reihenfolge Forchheim - Stockach - Heidenheim an, wenn auch nur um 1,8 bzw. 3,9 %.

Die Unterschiede zwischen den Varianten ohne und mit Kompost sind mit 1,0 bzw. 1,5 % nur für den Standort Forchheim statistisch abzusichern, obwohl sie am Standort Heidenheim teilweise (V3 - V9) sogar etwas größer sind. Ursache ist die an diesem Standort deutlich größere Streuung der Messwerte, vor allem in Variante V3. Außerdem geht sie in V12 gegenüber V9 wieder zurück, so dass der Anstieg in V9 gegenüber V3 wohl eher zufällig ist.

2.2.5 Nutzbare Feldkapazität 2 (nFK2, minimale nFK, Differenz der Volumenanteile an Wasser bei pF 2,5 und pF 4,2) [%], n = 16

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	9,5	0,7	12,9	1,9	14,1	3,4
V9	10,6	1,1	13,1	2,1	15,1	1,3
V12	11,3	1,3	13,4	2,4	14,9	2,6
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	**	***	ns	ns	ns	ns
V9		ns (9,7)		ns		ns

nFK2 ist am Standort Forchheim in der Variante V3 um 4,2 % niedriger als nFK1, an den beiden anderen Standorten um 2,6 % (Stockach) bzw. 3,5 % (Heidenheim).

Die Kompostwirkung ist nur für den Standort Forchheim statistisch gesichert, wobei der Anstieg um 1,1 bzw. 1,8 % noch etwas größer ausfällt als bei nFK1. An den beiden anderen Standorten ist sie zwar tendenziell ebenfalls zu erkennen, die Differenzen von bis zu 1 % zur Variante ohne Kompost (V3) verfehlen jedoch die Signifikanzgrenzen mehr oder weniger deutlich, ebenso wie die Differenzen zwischen der niedrigeren und höheren Kompostgabe (z.B. Forchheim mit $\alpha = 10\%$).

2.2.6 Luftkapazität 1 (LK1, minimale Luftkapazität, Differenz zwischen dem gesamten Porenanteil und dem Volumenanteil an Wasser bei pF 1,8) [%], n = 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	21,9	2,3	13,8	3,9	18,3	5,8
V9	22,6	3,7	18,7	5,0	17,6	4,6
V12	22,6	3,6	19,1	6,8	15,9	6,1
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	ns	***	***	ns	ns (11,1)
V9		ns		ns		ns (19,9)

Die minimale Luftkapazität in den Böden der untersuchten Standorte liegt zwischen knapp 14 % und knapp 23 %. Sie ist damit nach KA5 [3] durchweg als hoch zu bezeichnen (LK4). An den Standorten Forchheim und Stockach steigt sie nach Komposteinsatz an, allerdings nur an letzterem signifikant. Am Standort Heidenheim ist eine Abnahme mit steigendem Komposteinsatz um bis zu 2,4 % zu erkennen. Dieser Betrag entspricht in etwa der Zunahme der Feldkapazität (vgl. Punkt 2.2.1), ist allerdings - im Gegensatz zu jener - nach dem t-Test nicht signifikant. Ursache ist die nun wesentlich größere Streuung der Ergebnisse innerhalb der Varianten, die dadurch bedingt ist, dass die Luftkapazität als Differenz zwischen dem Porenanteil und dem Wassergehalt bei Feldkapazität ermittelt wird. In ihre Streuung gehen somit Streuungen von mehr Parametern ein als bei der Bestimmung der Feldkapazität, nämlich der Trockenrohdichte (2 x), Kornrohdichte und Feldkapazität. Nach rein statistischen Kriterien ist daher die Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen von LK1 (und auch nachfolgenden LK2) nicht gegeben. Da jedoch der (hoch signifikanten) Zunahme der Feldkapazität bei gleich bleibendem Porenanteil die Abnahme einer anderen Porenklasse entsprechen muss und dies bei der Luftkapazität sowohl in Bezug auf den Betrag als auch in der Abstufung der Varianten gegeben ist, wird geschlossen, dass die Abnahme von LK1 (und auch die

von LK2) mit steigendem Komposteinsatz am Standort Heidenheim nicht zufallsbedingt sondern gesetzmäßig erfolgt.

2.2.7 Luftkapazität 2 (LK2, maximale Luftkapazität, Differenz zwischen dem gesamten Porenanteil und dem Volumenanteil an Wasser bei pF 2,5) [%], n = 16

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	26,2	1,9	15,7	4,0	21,9	6,2
V9	27,0	3,7	20,6	5,1	20,9	4,5
V12	27,0	3,1	21,4	8,1	19,2	6,2
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	ns	**	*	ns	ns
V9		ns		ns		ns

Die Nichtberücksichtigung des Wassers in den engen Grobporen bei der Bestimmung der Feldkapazität erhöht entsprechend die Luftkapazität. Sie liegt nun in den Proben vom Standort Forchheim bei durchweg über 26 % und damit in der Stufe LK5 (sehr hoch), an den beiden anderen Standorten bleibt die Stufe LK4 (hoch) erhalten.

Ebenso wie zuvor wirkt sich der Komposteinsatz nur am Standort Stockach signifikant aus, auch die Tendenz zur Erniedrigung der Luftkapazität mit steigendem Komposteinsatz am Standort Heidenheim bleibt erhalten. Sie ist nach dem t-Test zwar ebenso wenig statistisch gesichert wie die Wirkung des gesteigerten Komposteinsatzes in der Versuchsvarianten V12 gegenüber V9 generell, wird jedoch nach den voranstehenden Überlegungen (vgl. Punkt 2.2.6) ebenfalls als gesetzmäßig angesehen.

2.2.8 Wasserdurchlässigkeit im wassergesättigten Zustand, kf-Wert [cm/s], n = 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	0,0289	0,0208	0,0434	0,0628	0,0211	0,0222
V9	0,0321	0,0215	0,0596	0,0857	0,0211	0,0232
V12	0,0342	0,0200	0,0442	0,0517	0,0246	0,0280
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns	ns	ns	ns	ns	ns
V9		ns		ns		ns

Die Beurteilung der Messwerte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung [3] ergibt: Vom Standort Forchheim sind alle 96 Ergebnisse der Stufe kf6 (extrem hoch) zuzuordnen. Dies ist für die Krume dieses sehr sandreichen Standortes auch plausibel. Allerdings wies auch der allergrößte Teil der Proben von Stockach diese Einstufung auf. Nur vier ergaben die Stufe kf5 (sehr hoch) und eine die Stufe kf3 (mittel). Sowohl die Mittelwerte der Varianten als auch die Streuungen sind hier deutlich höher als bei den Proben aus Forchheim. Dies spricht für einen bevorzugten Wasserfluss in „Gröbstporen“, z.B. Regenwurmröhren, die auf die Proben nicht gleichmäßig verteilt sind und daher eine große Streuung der Messwerte innerhalb der gleichen Variante verursachen. Ähnliches gilt für Heidenheim, wenn auch nicht in gleichem Ausmaß. Dort waren auch mehr Proben zu identifizieren, die nicht der kf-Stufe 6 (extrem hoch) zuzuordnen waren: 11 fielen in die Stufe kf5 (sehr hoch), 10 in die Stufe kf4 (hoch) und 5 in die Stufe kf3 (mittel), wobei jedoch eine Abhängigkeit von den Kompoststufen nicht erkennbar war.

Insgesamt muss man feststellen, dass in keinem Fall eine signifikante Veränderung der Wasserleiteigenschaften durch die Kompostzufuhr auf die betroffenen Flächen nachgewiesen werden konnte. Dies ist angesichts der senkrecht vorgenommenen Probenentnahme und der (auch deshalb) in den Böden ohne Kompost meist schon vorhandenen extrem hohen Durchlässigkeit vielleicht auch gar nicht anders zu erwarten.

2.2.8 Wasserkapazität, WK [g/100 g TM], n = 4 (1 Bestimmung an jeder Mischprobe aus den 4 Wiederholungen der Versuchsvarianten)

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	36,0	1,4	46,8	1,3	51,1	0,9
V9	38,4	2,1	52,5	1,1	53,0	1,2
V12	40,4	2,7	52,4	0,8	55,4	1,0
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	ns (9,9)	*	***	***	ns (5,3)	***
V9		ns		ns		*

Die Bestimmung der Wasserkapazität dient der Einstellung einer definierten Bodenfeuchte bei der Durchführung bodenbiologischer Untersuchungen. Sie erfolgt am LTZ Augustenberg an lufttrockenem, locker lagerndem, auf eine Teilchengröße < 2 mm gesiebttem Material gestörter Bodenproben durch kapillaren Wasseraufstieg in einem Filtertiegel. Insofern sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar mit den o.g. Wasserhaushaltsparametern, z.B. der Feldkapazität, was schon in der anderen Maßeinheit zum Ausdruck kommt. Es wird vielmehr die Wasserhaltefähigkeit der dann vorliegenden Einzelteilchen und Aggregate festgestellt, die natürlich von Bodeneigenschaften wie Textur, Gehalt an organischer Substanz und Porosität der Aggregate beeinflusst wird.

Die vorliegenden Ergebnisse spiegeln zunächst (V3) die unterschiedliche Textur der Versuchsböden wider, die Wasserkapazität steigt in der Reihenfolge Forchheim - Stockach - Heidenheim jeweils signifikant. Die langjährige Kompostanwendung führt durchweg zu einem deutlichen Anstieg der Wasserkapazität, wobei die erhöhte Gabe im Vergleich zur Normalgabe in den Böden aus Forchheim und Heidenheim annähernd die gleiche Steigerung bewirkt. Zwar sind wegen der geringen Anzahl an Bestimmungen die Mittelwertsdifferenzen nur in 5 von 9 möglichen Vergleichen signifikant, liegen jedoch zusätzlich in zwei Fällen nahe an der Signifikanzgrenze.

2.2.9 Wassergehalt der Proben zum Zeitpunkt der Entnahme (WG Pr, Volumenanteil) [%], n = 16 bzw. 32

Standort	Forchheim		Stockach		Heidenheim	
	MW	s	MW	s	MW	s
V3	15,9	1,4	26,9	2,0	21,1	2,9
V9	17,2	2,0	24,6	2,6	20,8	3,0
V12	18,3	2,1	24,1	2,6	23,3	3,1
Signifikanz der Mittelwertsdifferenzen						
	V9	V12	V9	V12	V9	V12
V3	*	***	***	***	ns	**
V9		ns (5,1)		ns		**

Die Bestimmung des Wassergehaltes zum Zeitpunkt der Probenentnahme bietet die Möglichkeit, die zum Wasserhaushalt der Böden ermittelten Werte zu plausibilisieren bzw. weite-

re, unter den realen Bedingungen im Freiland zum Tragen kommende Kompostwirkungen zu erfassen.

Wie zuvor schon erwähnt, fand die Probenahme am Standort Forchheim nach ausgiebigen Niederschlägen statt, so dass zumindest seine Krume auf Feldkapazität (FK2) aufgefüllt war. Daher spiegeln die Wassergehalte der Proben zum Entnahmezeitpunkt die zuvor berichtete Erhöhung der Feldkapazität mit steigendem Komposteinsatz wider. Mit 2,4 % ist die Differenz zwischen V3 und V12 nunmehr sogar etwas größer, so dass die Signifikanzgrenze beim Vergleich von V9 und V12 nur sehr knapp verfehlt wird.

Am Standort Stockach sinken die Wassergehalte mit steigendem Komposteinsatz. Außerdem liegen sie durchweg deutlich unter der Feldkapazität, nämlich im Mittel bei 87 % (V3), 80 % (V9) bzw. 78 % (V12) von FK1. Der im Boden gespeicherte Wasservorrat war also zum Zeitpunkt der Probenahme um so mehr beansprucht, je höher der Komposteinsatz war. Die Evapotranspiration muss somit im vorangegangenen Zeitraum entsprechend erhöht gewesen sein, entweder weil die Pflanzen wegen größerer Wurzelmasse mehr Wasser entnommen haben oder weil das ungesättigte Fließen von Wasser im Boden generell und damit auch an die Bodenoberfläche (Evaporation) durch den Komposteinsatz gesteigert wurde. Beides wäre als positive Kompostwirkung zu bezeichnen.

Am Standort Heidenheim lagen die Wassergehalte bei der Probenahme - bezogen auf die Feldkapazität (FK2) - noch niedriger, nämlich bei 64 % (V3), 61 % (V9) bzw. 67 % (V12). Zwischen V3 und V9 ergeben sich keine signifikanten Unterschiede, wohl aber zwischen beiden Varianten und V12, welche die höheren Wassergehalte aufweist. Dieser Befund stimmt tendenziell mit der Tatsache überein, dass dort auch die höchste Wasserkapazität ermittelt wurde. Die für den Standort Stockach belegte stärkere Ausnutzung des Wasservorrats mit steigendem Komposteinsatz ist für den Standort Heidenheim jedoch nicht ersichtlich.

3 Zusammenfassende Beurteilung

Nach den voranstehenden Untersuchungsergebnissen ist die Wirkung, welche die langjährige Ausbringung und Einarbeitung von Kompost auf die physikalischen Eigenschaften der Versuchsböden verursacht, abhängig von deren Grundeigenschaften, vor allem von ihrer Korngrößenzusammensetzung (Textur), aber auch dem Grad der Verdichtung, in dem sie vorliegen.

In dem relativ (d.h. angesichts des niedrigen Tongehaltes) locker lagernden Sandboden am Standort **Forchheim** erniedrigt sich die Trockenrohdichte bzw. erhöht sich der (gesamte) Porenanteil durch die langjährige Kompostanwendung beträchtlich. Die Erhöhung betrifft vor allem die Wasser-speichernden Fein- und Mittelporen, während die Grobporen weitgehend unbeeinflusst bleiben. Folglich nimmt die Feldkapazität, bei der höchsten Kompostgabe auch der Anteil an Totwasser, signifikant zu. Daraus resultiert eine Steigerung der nutzbaren Feldkapazität um bis zu 1,8 %.

Der Kompost bewirkte auf diesem Standort mit einem hohen Anteil an Grobporen also eine für die Kulturen günstigere Porengrößenverteilung. Die zusätzliche Wirkung der höheren Kompostgabe gegenüber der Normalgabe war zwar nur im Hinblick auf die Trockenrohdichte signifikant ($\alpha > 5\%$), lag bei den anderen Parametern jedoch oft nahe der Signifikanzgrenze.

Eine gesicherte Wirkung auf die Aggregatstabilität konnte nicht nachgewiesen werden. Erklärt wird dies damit, dass bereits der durch Kompost unbeeinflusste Boden einen überraschend hohen Anteil stabiler Aggregate enthält.

Ähnliches gilt für die Wasserdurchlässigkeit (kf-Wert). Sie war in allen Proben extrem hoch, auch in denen aus der Variante ohne Kompost, so dass sich dessen Anwendung allenfalls mindernd hätte auswirken können. Da jedoch die Kompostanwendung den Anteil wasserleitender Grobporen kaum veränderte, ist das Ausbleiben einer Wirkung auf die Wasserdurchlässigkeit plausibel.

Der Lehm Boden am Standort **Stockach** wurde nach der effektiven Lagerungsdichte als stärker verdichtet eingestuft als die Böden der beiden anderen Standorte. Ursache ist möglicherweise ein höherer Ungleichförmigkeitsgrad, der sich aus den nahezu gleichen Anteilen an Ton, Schluff und Sand ergibt. „Mit steigender Ungleichförmigkeit erhöht sich die Verdichtbarkeit, weil sich ungleich große Körner stärker ineinander verkeilen können. Die Widerstandsfähigkeit gegen Krafteinwirkungen nimmt zu.“ [4, S. 16].

Auch an diesem Standort erniedrigt der Komposteinsatz die Trockenrohdichte und erhöht den Porenanteil signifikant. Beeinflusst sind hier jedoch vor allem die mittleren und weiten Grobporen > 50 µm, deren Anteil sich um 5,3 % erhöht, während Fein- und Mittelporen weitgehend unbeeinflusst bleiben. Gegenüber den Varianten ohne Kompost steigt daher die Luftkapazität sehr hoch signifikant, während die Feldkapazität, der Anteil an Totwasser und die nutzbare Feldkapazität auf nahezu gleichem Niveau verbleiben. Wie bei den anderen genannten Parametern ist auch bei der Luftkapazität eine erhöhende Wirkung der gesteigerten Kompostgabe nicht ersichtlich. Angesichts der mit mindestens 14 % ausreichend hohen Luftkapazität in den Varianten ohne Kompost ist die Kompostwirkung, die eine Steigerung um 5,3 % bringt, vom bodenphysikalischen Standpunkt sicherlich nicht negativ aber auch nicht unbedingt positiv einzuschätzen.

Trotz der genannten Erhöhung des Anteils wasserleitender Grobporen ist eine signifikante Beeinflussung der Wasserleiteigenschaften durch die Kompostanwendung in den Wasserdurchlässigkeitsmessungen nicht zu erkennen. Ursache ist vermutlich, dass der Hauptanteil der Wasserleitfähigkeit von „Gröbtporen“, z.B. Regenwurmröhren, beigesteuert wird, diese jedoch nicht gleichmäßig auf die Proben verteilt sind, so dass innerhalb der gleichen Variante eine große Messwertstreuung gegeben ist, die sich trotz der großen Anzahl an Parallelproben (8 je Variante und Wiederholung) auch auf die Mittelwertbildung auswirkt.

Die höhere effektive Lagerungsdichte des Bodens am Standort Stockach gegenüber den beiden anderen Standorten kann die Ursache für die höhere Aggregatstabilität sein, die von diesem Boden ermittelt wurde. Die Kompostzufuhr erhöht diese nicht mehr weiter.

Der Boden am Standort **Heidenheim** ist ein schluffiger Lehm mit niedriger effektiver Lagerungsdichte. Der Komposteinsatz bewirkt hier weder eine signifikante Beeinflussung der Trockenrohdichte noch des Porenanteils. Dagegen erhöht er den Anteil an Fein- und Mittelporen, zwar nur um 1,0 % (jährlich 10 t/ha TM) bzw. 2,2 % (jährlich 20 t/ha TM), jedoch signifikant. Ihr steht eine Verringerung des Anteils an Grobporen um 1,0 % bzw. 2,7 % gegenüber. Da jedoch auch der Anteil an Totwasser erhöht wird, zumindest durch die erhöhte Kompostgabe, ist der Komposteinfluss auf die nutzbare Feldkapazität nicht eindeutig, jedenfalls nicht signifikant. Eine positive Wirkung des Komposteinsatzes auf den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens an diesem Standort ist somit nicht abzuleiten.

Die geringfügige Verminderung des Anteils wasserleitender Grobporen durch die Kompostanwendung führt zu keiner signifikanten Veränderung der Wasserdurchlässigkeit.

Dagegen bewirkt sie eine signifikante Erhöhung der Aggregatstabilität, die auf diesem eher strukturlabilen Boden eindeutig positiv zu bewerten ist (Verminderung der Oberflächenver-
schlammung durch Niederschläge).

Nachfolgende Tabelle gibt abschließend einen zusammenfassenden Überblick über die Auswirkung der Kompostgaben auf die ermittelten Parameter. Zu ihrer Kennzeichnung werden folgende Symbole verwendet: +: Wirkung erhöhend, -: Wirkung erniedrigend, 0: keine eindeutige Wirkung feststellbar. Die Kennung V9/V3 betrifft die Wirkung der einfachen, V12/V3 die der erhöhten Kompostgabe gegenüber der Variante ohne Kompost, V12/V9 die der erhöhten gegenüber der einfachen Kompostgabe.

	Forchheim			Stockach			Heidenheim		
	V9/V3	V12/V3	V12/V9	V9/V3	V12/V3	V12/V9	V9/V3	V12/V3	V12/V9
pt	-	-	-	-	-	0	0	0	0
PA	+	+	0	+	+	0	0	0	0
AS	0	0	0	0	0	0	+	+	0
FK1	+	+	0	0	0	0	+	+	0
FK2	+	+	0	0	0	0	+	+	+
Totwasser	0	+	0	0	0	0	0	0	+
nFK1	+	+	0	0	0	0	0	0	0
nFK2	+	+	0	0	0	0	0	0	0
LK1	0	0	0	+	+	0	-	-	-
LK2	0	0	0	+	+	0	-	-	-
kf	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WK	0	+	0	+	+	0	(+)	+	+
WG Pr	+	+	(+)	-	-	0	0	+	+

4 Literatur

- [1] Pfeleiderer, H. (1986): Wirkungen meliorativer Gaben von Gesteinsmehlen zu Sandboden und von Gesteinssanden zu Tonboden auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die Veränderung einiger bodenphysikalischer und -chemischer Kennwerte. Dissertation, Universität Hohenheim
- [2] LUFA Augustenberg (1998): Ergebnisse der Sieb-/Schlamm-analyse von Proben aus Bodenprofilen der Kompostversuche an den Standorten Stockach und Heidenheim
- [3] AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl. (KA5), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- [4] Kretschmer, H. (1997): Körnung und Konsistenz. In: Blume, H.-P, Felix-Henningsen, P., Fischer, W.R., Frede, H.-G., Horn, R., Stahr, K.: Handbuch der Bodenkunde, Kapitel 2.6.2.1 Körnung und Konsistenz, ecomed, Landsberg/Lech