

## **5 Forschungsberichte der Arbeitsgruppen**

### **5.1 Bewertung der Bodenstruktur mit Indikatoren der visuellen Gefügeansprache**

Eva Höhne, Jan Rücknagel, Olaf Christen

#### **Zusammenfassung**

Im ersten Teil des Berichtes werden die Zusammenhänge zwischen Bodenphysikalischen und -mechanischen Messwerten und den Parametern der Gefügeansprache im Feld hergestellt und diskutiert. Im zweiten Teil werden die erhobenen Labordaten auf der Systemebene ökologisch-konventionell ausgewertet.

Die visuelle Gefügeansprache auf dem Feld bietet die einfache Möglichkeit Informationen zum Zustand der Bodenstruktur zu erhalten. Inwieweit diese Gefügebewertung mit messbaren physikalischen und mechanischen Bodenkennwerten korrespondiert, ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Es wurden zwei Feldmethoden (Packungsdichte nach DIN 19682 (2007) und Spatendiagnose nach Diez (1991)) mit ihren einzelnen Parametern (Wurzelverteilung, Makroporen, Aggregatgröße, Lagerung der Aggregate, Gefügeart und Verfestigungsgrad) den Messwerten der Trockenrohdichte, effektiven Lagerungsdichte, Luftkapazität, gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) und mechanischen Vorbelastung (-6 kPa Matrixpotential) gegenübergestellt. Als zusätzlicher Parameter wurde der mechanische Widerstand mit einem Taschenmesser nach dem Schema von Harrach (1991) bewertet. Auf 25 landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen (10 konventionell und 10 ökologisch bewirtschafteten Praxisflächen sowie 5 Feldversuchsflächen) in verschiedenen Regionen Deutschlands wurden dazu Bodenproben entnommen und parallel zu dieser Beprobung die visuelle Gefügeansprache durchgeführt.

Für die einzelnen Bodenartengruppen lassen sich spezifische Einzelmerkmale identifizieren, die insgesamt besonders gut mit den physikalischen und mechanischen Laborwerten korrelieren. So ist bei Lehm Böden besonders auf die Aggregatgröße, die Lagerung der Aggregate zueinander und auf den Verfestigungsgrad zu achten. Die Wurzelverteilung ist auf Sandböden das bedeutendste Einzelmerkmal. Auf Schluffböden sollte das Hauptaugenmerk auf der Lagerung der Aggregate, der Wurzelverteilung und dem Verfestigungsgrad liegen. Bei Tonböden ist die Bedeutung der einzelnen Gefügemerkmale wesentlich ausgeglichener. Hier sollte allen Parametern Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Gefügestufe ist auf allen Standorten ein wichtiges Merkmal.

Bei Boniturnote 3 werden nach beiden Schemata auf den meisten Standorten die Mindestanforderungen gemessen an physikalischen Laborwerten noch hinreichend gut erfüllt. Die mittleren mechanischen Vorbelastungen bei dieser Boniturnote bewegen sich in einem Rahmen zwischen etwa 80 kPa (Schluffböden), 100 kPa (Tonböden) und um 130 kPa (Lehm- und Sandböden). Lediglich die Bewertung der Lehm Böden bei Note 3 entspricht nicht den Mindestansprüchen an den bodenphysikalischen Zustand.

Die Spatendiagnose erwies sich insgesamt als ein praktisches Instrument des physikalischen Bodenschutzes, das eine breite Anwendung erlaubt und aufwändige Laboruntersuchungen einzusparen hilft. Mit beiden hier untersuchten Schemata ist der Nachweis von Bodenschadverdichtungen beziehungs-

weise die Bewertung des Gefügestandes an sich gut möglich, obwohl sie den Schwerpunkt der Beurteilung auf unterschiedliche Einzelparameter legen. Sie kommen sogar zu ähnlichen Spannen für die physikalischen Bodenparameter bei gleicher Boniturnote. Eine Anpassung der Boniturschemata an differenzierte Standortbedingungen würde deren Genauigkeit vermutlich weiter verbessern.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse der bodenphysikalischen und -mechanischen Laboranalysen zeigt Unterschiede in der Ackerkrume der Lehm- und Tonböden zwischen den Bewirtschaftungssystemen ökologisch und konventionell. Im Bereich des krumennahen Unterbodens konnten keine Unterschiede zwischen ökologisch und konventionell bewirtschafteten Flächen gefunden werden. Auch eine Feldbonitur mittels Spatendiagnose auf 40 ökologisch und 39 konventionell bewirtschafteten Flächen kam zu keinem anderen Ergebnis. Diese Untersuchung gibt Hinweise darauf, dass die strukturfördernden Maßnahmen der ökologischen Bewirtschaftungsweise – z.B. Anbau von Leguminosen, Förderung der organischen Bodensubstanz, Einsatz leichterer Maschinen - durch andere systemtypische Verfahren – z.B. mechanische Unkrautregulierung, verstärkter Anbau von Sommerungen und allgemein die höhere Anzahl an Überfahrten - aufgehoben werden.

Schlüsselwörter: Bodenstruktur, mechanische Bodenkennwerte, Spatendiagnose, Trockenrohdichte, Bodenschadenverdichtung

### **Abstract**

Visual structure designation is a simple method of obtaining information about the state of soil structure. The extent to which this assessment corresponds to physical and mechanical soil measurements is the subject of this study. Two methods (packing density according to DIN 19682 (2007) and spade diagnosis according to Diez (1991)) were compared, with their individual parameters (root spread, macropores, mechanical soil resistance, aggregate size, aggregate settlement, aggregate type and degree of soil solidification), to measurements of dry bulk density, effective packing density, air capacity, saturated water conductivity and mechanical precompression stress (-6 kPa matric potential).

For the individual main soil type groups, single parameters can be identified which correlate strongly with the laboratory values. In the case of loamy soils, particular attention should be paid here to aggregate size, aggregate settlement in relation to other aggregates and the degree of solidification. In sandy soils, root spread is the most significant individual characteristic. For silty soils, the main focus should be on aggregate settlement, root spread and the degree of solidification. With clay soils, attention should be paid to all of the parameters. The aggregate type is an important characteristic at all sites.

In the case of soil scoring level 3, at most of the sites the minimum requirements measured by way of physical laboratory values are still sufficiently fulfilled. The average mechanical precompression stress levels at this scoring range for silty and clay soils between 80 kPa and 100 kPa. In this area, the sandy and loamy soils display values of 135 kPa.

Both of the schemas applied represent a useful opportunity to obtain evidence of soil compaction damage and to assess the structural state of the soil itself, although for each of these the emphasis of as-

assessment lies on different parameters. Adjusting the soil appraisal schemas to different, site-specific conditions would presumably further improve the accuracy of these.

There were no statistically significant differences between the organic and the conventional treatments in soil physical parameters. The visual soil structure assessment (spade diagnose) showed the same results from 40 organic and 39 conventional test fields as well. This could be an advice that the positive effects of special organic farming, like cultivation of legumes, special focus on soil organic matter or the use of machines with a small weight, is offset by other special features of organic farming – e.g. higher impact of working steps for mechanical weed regulation or cropping of spring crops with tillage early in the season.

Keywords: soil structure, mechanical soil measurement, spade diagnosis, bulk density, soil compaction

### 5.1.1 Einleitung

Die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft werden entscheidend vom Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf geprägt. Dabei spielt der Boden in seiner Funktion als Speicher und Filter aber auch als Ort von Transformationsprozessen der genannten Kreisläufe eine zentrale Rolle. Das Bodengefüge beeinflusst in vielfältiger Weise bodenökologische sowie für das Pflanzenwachstum relevante Funktionen. So wirkt sich der Zustand des Gefüges direkt auf die Durchwurzelung (Dannowski, 1983; Dannowski, 1987) und damit die Aneignung der Nährstoffe aus (Herbst und Hofmann, 2005). In verdichteten Böden ist eine Abnahme der mikrobiellen Biomasse zu beobachten (Kayser et al., 1995), Bodentiere, besonders solche, die nicht selbst graben haben nur eingeschränkte Lebensmöglichkeiten, (Larink et al., 1995) und durch den gestörten Luft- und Wasserhaushalt kommt es zu erhöhten N<sub>2</sub>O-Emissionen (Aulakh et al., 1992). Insbesondere im ökologischen Landbau sind die Kulturpflanzen zur bedarfsgerechten Versorgung mit Nährstoffen aber auf diese Umsetzungsvorgänge im Boden angewiesen. Bodenverdichtungen führen folglich, und nicht nur im ökologischen Landbau, zu deutlichen Ertragseinbußen und der Zunahme der Ertragsunsicherheit (Ehlers et al., 2000; Voorhees, 2000). Zudem bedingt ein kompaktes Gefüge verringerte Infiltrationsleistungen und einen gesteigerten Oberflächenabfluss sowie Erosion (Fleige und Horn, 2000).

Das Bodengefüge beschreibt allgemein die räumliche Anordnung der Bodenteilchen sowie -aggregate und damit einen physikalischen Zustand. Dieser lässt sich durch verschiedene Labormethoden sehr exakt erfassen. Eine vergleichsweise einfach zu bestimmende Größe ist die Trockenrohdichte, als ein Maß für den Verdichtungszustand des Bodens. Aussagen über die Verteilung und Leistungsfähigkeit des Porensystems sind mit der Trockenrohdichte allein nicht möglich. Die absolute Höhe ist zudem sehr stark texturabhängig. Eine bessere Vergleichbarkeit über das gesamte Texturspektrum landwirtschaftlich genutzter Böden soll durch die effektive Lagerungsdichte erreicht werden. In deren Berechnung fließt zusätzlich der Tongehalt ein (AG Bodenkunde, 2005). Daneben ist die Luftkapazität eine wichtige bodenökologische Größe. Sie beschreibt den Luftgehalt des Bodens bei Feldkapazität und umfasst im deutschsprachigen Raum Poren mit einem Äquivalentdurchmesser >5 0 µm (-6 kPa Matrixpotential), in denen sich Wasser der Schwerkraft folgend bewegt. Die Luftkapazität erlaubt allein jedoch keine abschließende Aussage über die Leistungsfähigkeit und Kontinuität dieser groben Poren. Hierfür ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit ein wichtiges Maß. Diese Größe beschreibt die Wasserdurchlässigkeit eines wassergesättigten Bodens. Neben den physikalischen Zustandsparametern des Bodenge-

füges hat sich die mechanische Vorbelastung als wichtiges Kriterium für die Anfälligkeit gegenüber Verdichtung etabliert. Dieser Wert entspricht dem maximalen Druck der in der Vergangenheit auf den Boden, z.B. durch Befahrung eingewirkt hat, wenn er unter den gleichen Belastungsbedingungen ermittelt wird (Topp et al., 1997).

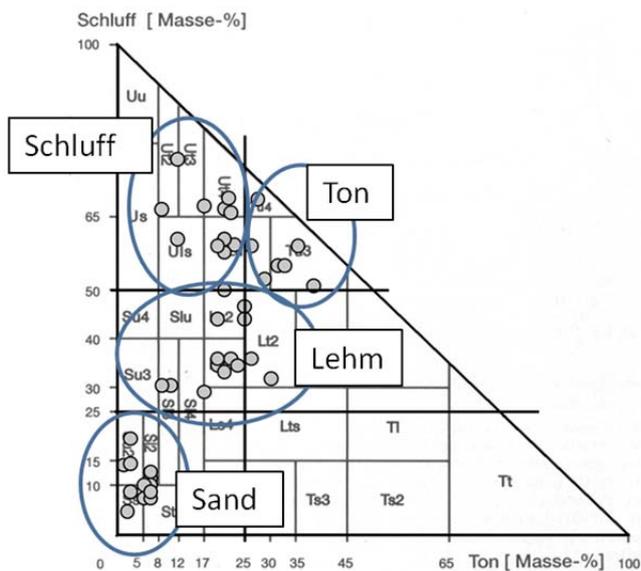
Allen beschriebenen physikalischen und mechanischen Laborparametern ist der hohe zeitliche und finanzielle Aufwand für die Bestimmung gemein. Eine breite Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis ist deshalb nahezu unmöglich, zumal das Bodengefüge oftmals großen zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegt. Hier sollen einfach zu handhabende Boniturmethode helfen, einen umfassenden Gesamteindruck über das Bodengefüge zu erhalten. Bei ihnen werden sensorisch zu ermittelnde Parameter, wie die Wurzelverteilung, die Aggregatgröße, die Lagerung der Aggregate, der Verfestigungsgrad, der mechanische Widerstand, die Gefügeform und die Makroporenverteilung direkt im Feld ermittelt. Oft wird hierzu ein mit dem Spaten ausgestochener Bodenblock genutzt, weshalb diese Vorgehensweise auch als „Spatendiagnose“ bezeichnet wird. Die Bewertung der Einzelparameter kann in verschiedenen Schemata erfolgen. In Deutschland sind vor allem die Methoden von Diez (1991) und die Ermittlung der Packungsdichte (Harrach und Vorderbrügge, 1991; DIN 19682-10, 2007) sehr verbreitet. Daneben gibt es zahlreiche weitere, aber weniger etablierte Bewertungshilfen (u.a. Werner und Thämert, 1989; Weyer und Boeddinghaus, 2009; Brunotte et al., 2011).

Vorrangiges Ziel dieses Teilprojektes ist die Beschreibung und Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen ausgewählten Methoden der visuellen Gefügebewertung sowie deren einzeln erfassten Gefügemerkmale und bodenmechanischen sowie -physikalischen Labor Kennwerten. Aus diesen Beziehungen sollen Bereiche abgeleitet werden, in denen die Mindestanforderungen an den physikalischen Bodenzustand gewährleistet sind. Den Bereichen können danach jeweils die mechanischen Stabilitäten der Böden in Form der Vorbelastung zugeordnet werden. Darüber hinaus wird der Frage nachgegangen, welche der visuell erfassten Einzelparameter innerhalb der verwandten Boniturmethode besonders relevant für die bodenmechanischen und -physikalischen Labor Kennwerte sind.

## **5.1.2 Material und Methoden**

### **5.1.2.1 Datenerhebung und Probenahme**

Auf 20 Praxisflächen des PilotbetriebeNetzwerks des Projekts „Klimawirkung und Nachhaltigkeit von Landbausystemen“ und ergänzend auf fünf Versuchsflächen wurden jeweils aus der Ackerkrume (17 - 23 cm) und dem krumennahen Unterboden (32 - 38 cm) Proben für physikalische und mechanische Laboranalysen entnommen und parallel dazu eine visuelle Gefügeansprache im Feld in den gleichen Tiefen durchgeführt. Um die Spannbreite häufig vorkommender Bodenarten in der Fragestellung ausreichend berücksichtigen zu können, spielte ein breites Texturspektrum bei der Standortwahl eine wichtige Rolle. Die Einordnung in die Bodenarten folgt dabei dem Schema der KA5 (AG Bodenkunde, 2005) (Abbildung 5.1-1). Es sind Standorte aus allen Bodenartengruppen (Sande, Schluffe, Lehme und Tone) vertreten wobei Sande mit einem Schluffanteil > 25 % der Bodenartenhauptgruppe der Lehme zugeordnet wurden. Alle Flächen waren zum Zeitpunkt der Probenahme mit Winterweizen bzw. Winterroggen bestellt. Die Untersuchungen fanden bis auf zwei Ausnahmen im Frühjahr statt. Diese wurden im Herbst beprobt.



**Abbildung 5.1-1:** Einordnung aller untersuchten Proben in das Korngrößendreieck nach AG Bodenkunde (2005) (verändert) und deren Zuteilung zu den Bodenartenhauptgruppen.

### 5.1.2.2 Bodenphysikalische und -mechanische Untersuchungen

Für die Untersuchung des Druck-Setzungsverhalten der Böden sind 220 cm<sup>3</sup> Stechzylinder (h=2,8 cm, d=10 cm, n=5) entnommen und in einer Sandsaugbox auf ein Matrixpotential von -6 kPa eingestellt worden. Sie dienten der Durchführung eines eindimensionalen drainierten Kompressionsversuches mit behinderter Seitendehnung (DIN 18135). Die Druckstufen von 5, 10, 25, 50, 100, 200, 350, 550 und bei einem Teil der Proben auch von 1200 und 2500 kPa wurden nacheinander für jeweils 180 Minuten auf die Probe aufgebracht. Zwischen den Belastungsstufen war jeweils eine Entlastungszeit von 15 Minuten bei einer Druckstufe von 2 kPa. Eine vollständige Entlastung war aus technischen Gründen nicht möglich. Die Bestimmung der mechanischen Vorbelastung anhand der Druck-Trockenrohdichte-Funktion erfolgte nach dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936) durch zwei unabhängige Personen (Rücknagel et al., 2010).

Neben den Stechzylindern zur Ermittlung der mechanischen Vorbelastung wurden Stechzylinder mit einem Volumen von 250 cm<sup>3</sup> (h=6 cm, d=7,28 cm, n=8) entnommen. Auch diese wurden zunächst in einer Sandsaugbox auf einen Wassergehalt von -6 kPa entsprechend der Feldkapazität eingestellt. Als Differenz aus dem Gesamtporenvolumen und dem Wasservolumen bei Feldkapazität ergibt sich die Luftkapazität (DIN ISO 11274). Weiterhin wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit in einer stationären Anlage ermittelt (DIN 19683-9). Die Trocknung der 220 und 250 cm<sup>3</sup> Stechzylinder bei 105°C bis zur Massekonstanz diente zur Ermittlung der Trockenrohdichte (DIN ISO 11272).

Aus der Trockenrohdichte (TRD) und dem Tongehalt (T) der jeweiligen Probe berechnet sich die effektive Lagerungsdichte (eLD) empirisch nach bodenkundlicher Kartieranleitung (AG Bodenkunde, 2005):

$$eLD [g \text{ cm}^{-3}] = TRD [g \text{ cm}^{-3}] + 0,009 * T [M\%] \quad [1]$$

### 5.1.2.3 Visuelle Gefügebewertung

Die Gesamtboniturnoten des Gefüges wurden zum einen nach dem Schema von Diez (1991) und zum anderen nach dem Schema der DIN 19682-10 (2007) zur Ermittlung der Packungsdichte vergeben. Die Spannweite der Noten in den Schemata bewegt sich im Bereich von 1 (sehr günstig) bis 5 (sehr ungünstig) und orientiert sich an der Güte der Bodenstruktur für das Pflanzenwachstum. Die Gesamtnoten setzen sich aus Teilnoten von Einzelmerkmalen zusammen, die je nach Schema mit unterschiedlicher Gewichtung berücksichtigt werden (Formeln 2 und 3). Diese Merkmale sind: der mechanische Widerstand (meWi), die Aggregatgröße (Aggr), der Verfestigungsgrad (Fallprobe) (Verfg), die Lagerung der Aggregate (LaAgr), die Makroporenverteilung (Mapo), die Wurzelverteilung (Wuve) und die Gefügeform (Gefo). Auf Böden ohne Aggregatgefüge konnten die Merkmale „Aggregatgröße“ und „Lagerung der Aggregate“ nicht berücksichtigt werden. Sie fließen deshalb auch nicht in die Gesamtnoten ein. Um dennoch besonders auf diesen Böden Informationen zum bodenmechanischen Zustand zu erlangen wurde zusätzlich der mechanische Widerstand mit einem Taschenmesser nach dem Schema von Harrach (1991) als Einzelparameter bewertet. Die Bewertung der Einzelmerkmale erfolgte nach den in Tabelle 5.1-1 beschriebenen Klassifikationen und fand je Versuchsfläche in vierfacher Wiederholung statt.

$$Note\_Diez = \frac{N_{Gefo} + N_{Wuve} + N_{Mapo}}{n_{Gefo} + n_{Wuve} + n_{Mapo}} \quad [2]$$

$$Note\_PD = \frac{N_{Aggr} + N_{Verf} + 2 * (N_{Mapo} + N_{Lage}) + 3 * N_{Wuve}}{n_{Aggr} + n_{Verf} + 2 * (n_{Mapo} + n_{Lage}) + 3 * n_{Wuve}} \quad [3]$$

N = Gefügenote des Einzelparameters

n = Vorkommen des Merkmals (1 = ja, 0 = nein)

Tabelle 5.1-1: Einzelparameter der visuellen Gefügeansprache und deren Bewertung

Note	Wurzelveilung <sup>(1)</sup>	Biogene Makroporen <sup>(1)</sup>	Aggregatgröße <sup>(1)</sup>	Lagerung der Aggregate <sup>(1)</sup>	mechanischer Widerstand <sup>(3)</sup>	Verfestigungsgrad (Fallprobe) <sup>(1)</sup>	Gefügeform <sup>(2)</sup>	
							nicht aggregiert	aggregiert
1	die Wurzeln verteilen sich gleichmäßig über den ganzen Horizont (sehr gleichmäßig)	viele Poren vorhanden	< 0,2 cm	sperrig unorientierte Anordnung; viele Hohlräume	sehr gering	zerfällt schon bei Entnahme	Einzelkorngefüge	Kohärenzgefüge
2	Makroporen wie Regenwürgänge oder Spalten werden als bevorzugte Wurzelbahnen genutzt (gleichmäßig)	mittelviele große Poren; viele mittlere Poren	0,2 cm – 0,5 cm	offen Klüfte, Spalten zwischen den Aggregatoberflächen bilden kaum Abdrücke	gering	zerfällt bei Aufprall in zahlreiche Bruchstücke bzw. Aggregate	locker (ein lo)	locker zusammhängend, porös, bei Druck leicht zerfallend (Kit-lo)
3	die Wurzeln konzentrieren sich auf die durch Spalten getrennten Aggregatoberflächen und Makroporen (ungleichmäßig)	wenig Poren; viele mittelgroße Poren; viele feine Poren	0,5 cm – 2 cm	halboffen Aggregate teils durch Klüfte / Spalten getrennt	mittel	zerfällt bei Aufprall in wenige Bruchstücke bzw. Aggregate, die von Hand weiter aufgeteilt werden können		Bröckelgefüge (sub)
4	starke Häufung in Rissen und auf Aggregatoberflächen, teilweise kann von Wurzelfilz gesprochen werden (sehr ungleichmäßig)	wenig große Poren; mittelviele feine Poren	2 cm – 5 cm	fast geschlossen im Quellzustand nur wenige Hohlräume	hoch	zerfällt bei Aufprall in wenige Bruchstücke bzw. Aggregate, die von Hand nicht oder nur schwer weiter aufgeteilt werden können	verdichtet (ein-te)	fest zusammenhängend, dicht gelagert, kaum/keine Makroporen (kon)
5	sehr starke Häufung in Rissen, Abknicken der Wurzeln	wenig Poren	> 5 cm	geschlossen Aggregatoberflächen bilden vollkommene Abdrücke von einander	sehr hoch	zerfällt bei Aufprall kaum		Polyedergefüge (pol)
								Plattengefüge (pla)

<sup>(1)</sup> (DIN19682-10 2007) <sup>(2)</sup> (Diez 1991) <sup>(3)</sup> Harrach (1991)

### 5.1.2.4 Statistische Auswertung

Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form von „Box-Whisker-Plots“. Auf diese Weise können wesentliche Eckpunkte der Verteilungsfunktion der beschriebenen Merkmale in einem Diagramm abgebildet werden. Neben dem Mittelwert (gekennzeichnet durch ein Kreuz) und dem Median (gekennzeichnet durch eine fette Linie) wird das untere und das obere Quartil durch die Box beschrieben. Die Boxlänge, der sogenannte Interquartilabstand, umfasst somit 50 % der Daten und gilt als Streuungsmaß. Das Maximum bzw. das Minimum des Wertebereiches wird durch die „Whiskers“ abgebildet, falls diese nicht mehr als das 1,5-fache des Interquartilabstandes vom Median abweichen. Werte, die dieses Kriterium überschreiten, gelten als Ausreißer und werden als einzelne Datenpunkte gekennzeichnet.

Die Verrechnung der Vorbelastungsdaten basiert auf logarithmischer Skala, da der Untersuchungsparameter Vorbelastung bei Verwendung der Einheit kPa eine rechtsschiefe Häufigkeitsverteilung aufweist. Dies zeigt unter anderem die Zusammenstellung der Datensätze von Lebert (1989) und Nissen (1998). Auch die Messwerte für die gesättigte Wasserleitfähigkeit sind nicht normalverteilt und deswegen logarithmiert verrechnet worden.

In einigen Fällen wird die Standardabweichung ( $s$ ) als Streuungsmaß angegeben, die sich aus der Summe der Abweichungsquadrate (SQ) und der Anzahl der Wiederholungsmessungen ( $n$ ) nach folgender Formel berechnet:

$$s = \sqrt{(SQ / (n - 1))} \quad [4]$$

Die statistischen Auswertungen und erfolgten unter Zuhilfenahme der Software R (R Development Core Team, 2011) und SAS (SAS Institute Inc., 2008).

Die Messwerte aus den physikalischen Laboranalysen wurden mittels einer gepoolten Spearman-Rangkorrelation nach Formel 5 mit den Boniturnoten der visuellen Gefügebeurteilung in Beziehung gesetzt. Die Gesamtkorrelation setzt sich dabei aus Einzelkorrelationen zusammen, die innerhalb der Hauptbodenartengruppen (der Pools) berechnet werden. Auf diese Weise werden Scheinkorrelationen vermieden.

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^a 6 \sum_j d_i^2}{\sum_{i=1}^a n_i (n_i^2 - 1)} \quad \text{mit} \quad d_i = rg(x_i) - rg(y_i) \quad [5]$$

$a$  = der Parameter nach dem „gepoolt“ wird

$d$  = Differenz der Ränge von  $x$  und  $y$  einer Beobachtung

$rg(x_i)$  = der Rang von  $x$ ;

$rg(y_i)$  = der Rang von  $y$

$n$  = Anzahl der Wertepaare

Korrelationsmaße ( $r_s$ ), die bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ( $p < 0,05$ ) signifikant sind, werden mit (\*) und die, die bei 1 % ( $p < 0,01$ ) signifikant sind mit (\*\*) gekennzeichnet.

### 5.1.3 Ergebnisse

#### 5.1.3.1 Mechanische Vorbelastung

In den Abbildungen 5.1-2 sind die Boniturnoten des Diez-Schemas (Abbildung 5.1-2a) und des Packungsdichte-Schemas (Abbildung 5.1-2b) mit den entsprechenden Werten der mechanischen Vorbelastung für alle untersuchten Standorte dargestellt. Nach beiden Methoden nimmt die mechanische Vorbelastung kontinuierlich mit der Boniturnote um durchschnittlich je etwa log 0,20 zu. Im Mittel beträgt die Vorbelastung bei Note 1 im Diez-Schema log 1,62 (42 kPa) und im Packungsdichte-Schema log 1,33 (21 kPa). Bei der Boniturnote 2 betragen die Mittelwerte log 1,83 (68 kPa) im Diez-Schema und log 1,79 (61 kPa) im Packungsdichte-Schema. Bei Note 3 liegen die mittleren Werte bei log 2,00 (100 kPa) im Diez-Schema und bei log 2,04 (109 kPa) nach dem Packungsdichte-Schema. Für die Note 4 ergeben sich Mittelwerte von log 2,29 (195 kPa) im Diez-Schema und für das Packungsdichte-Schema von log 2,11 (129 kPa). Zwischen den beiden Boniturmethode gibt es über alle Standorte nur geringe Unterschiede. Die Vorbelastungswerte im Diez-Schema sind bei den Noten 1 und 2 etwas größer als im Packungsdichte-Schema. Die Spannweite der Vorbelastung ist unabhängig vom verwandten Schema innerhalb einer Boniturnote jedoch erheblich. Sie liegt beispielsweise innerhalb der Boniturnote 3, welche am häufigsten auftritt, zwischen rund log 1,40 (25 kPa) und log 2,40 (250 kPa). Die Interquartilsbreite, die 50 % der Werte beinhaltet, liegt immerhin zwischen rund log 1,80 (65 kPa) und log 2,20 (160 kPa). Der gepoolte Spearman-Rangkorrelationskoeffizient ( $r_s$ ) beträgt 0,47\*\* für die Bewertung nach dem Diez-Schema und 0,54\*\* für das DIN-Schema.

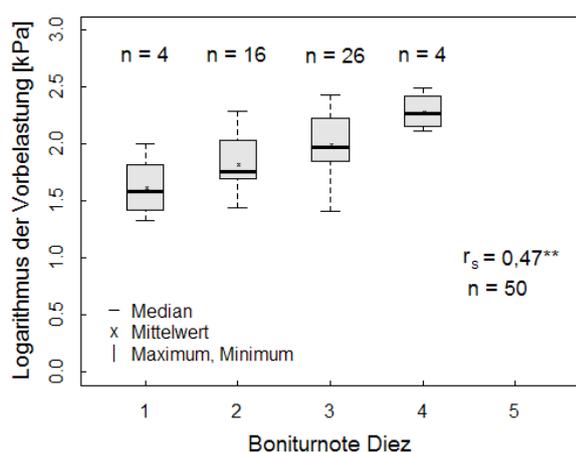


Abbildung 5.1-2a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Diez-Schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf allen Böden.

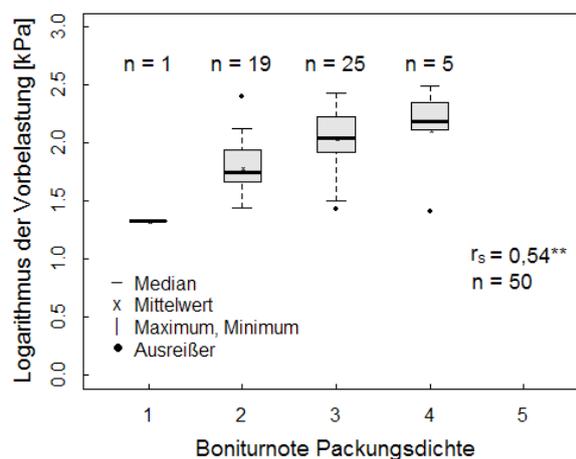
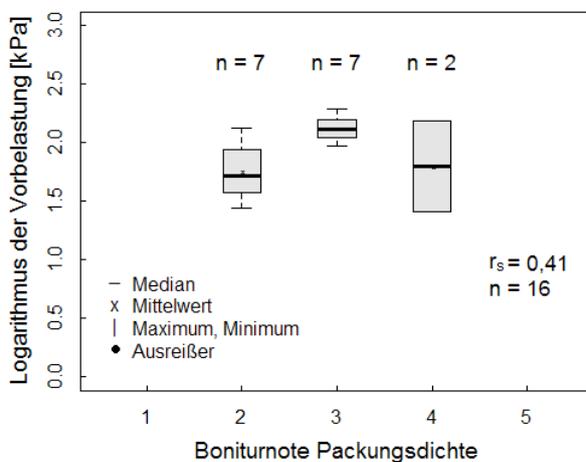


Abbildung 5.1-2b:

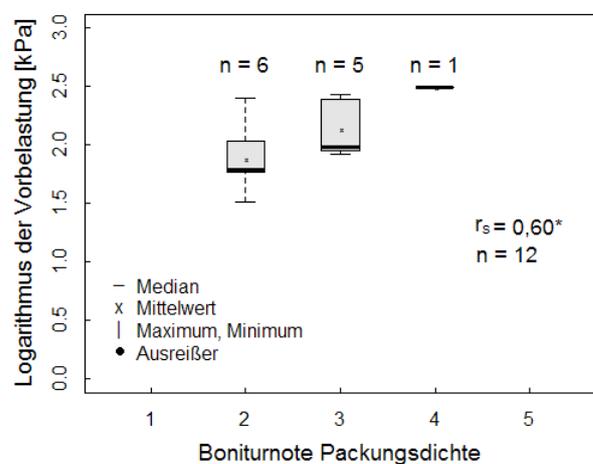
Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-Schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf allen Böden.

Bei einer Aufgliederung der Standorte nach einzelnen Bodenartengruppen zeigt sich mit Ausnahme der Lehmböden ebenfalls eine Zunahme der mechanischen Vorbelastung mit zunehmender Boniturnote (Abbildung 5.1-a bis Abbildung 5.1-d). Der Stichprobenumfang bei den Noten 1 und 4 ist innerhalb der jeweiligen Bodenartengruppe zum Teil jedoch gering ( $n = 0$  bis  $n = 2$ ). Die mittleren Vorbelastungen liegen innerhalb des PD-Schemas am Beispiel der Boniturnote 3 (Note mit der größten Häufigkeit) bei den Lehm- und Sandböden um  $\log 2,12$  (131 kPa) und bei den Tonböden um  $\log 2,00$  (100 kPa). Der Wert für die Schluffböden liegt mit  $\log 1,92$  (83 kPa) leicht darunter. Der Zusammenhang von mechanischer Vorbelastung und der Boniturnote wurde innerhalb der einzelnen Bodenartengruppen exemplarisch am Packungsdichte-Schema erläutert. Mit dem Diez-Schema lassen sich prinzipiell analoge Aussagen treffen.



**Abbildung 5.1-3a:**

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf Lehm Böden.



**Abbildung 5.1-3b:**

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf Sandböden.

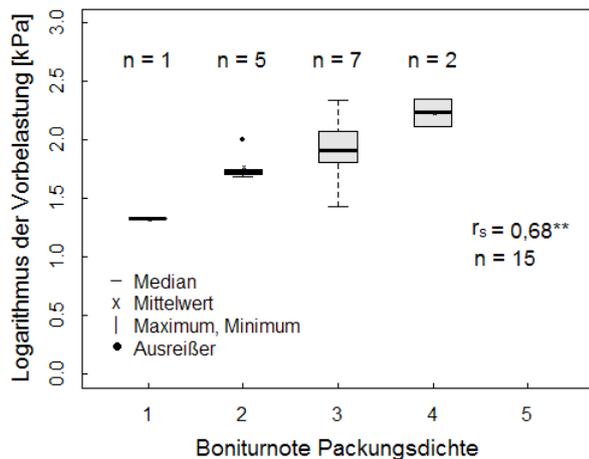


Abbildung 5.1-3c:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf Schluffböden.

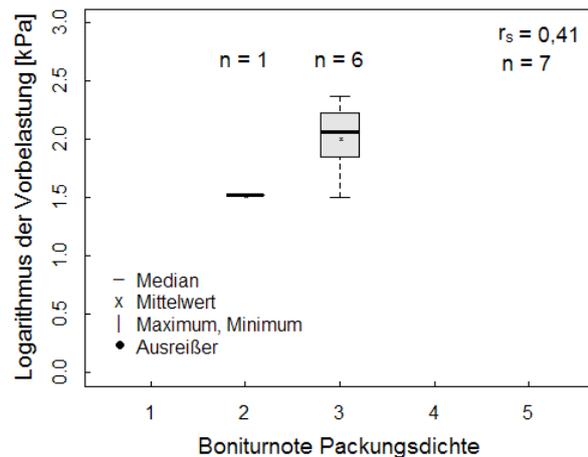


Abbildung 5.1-3d:

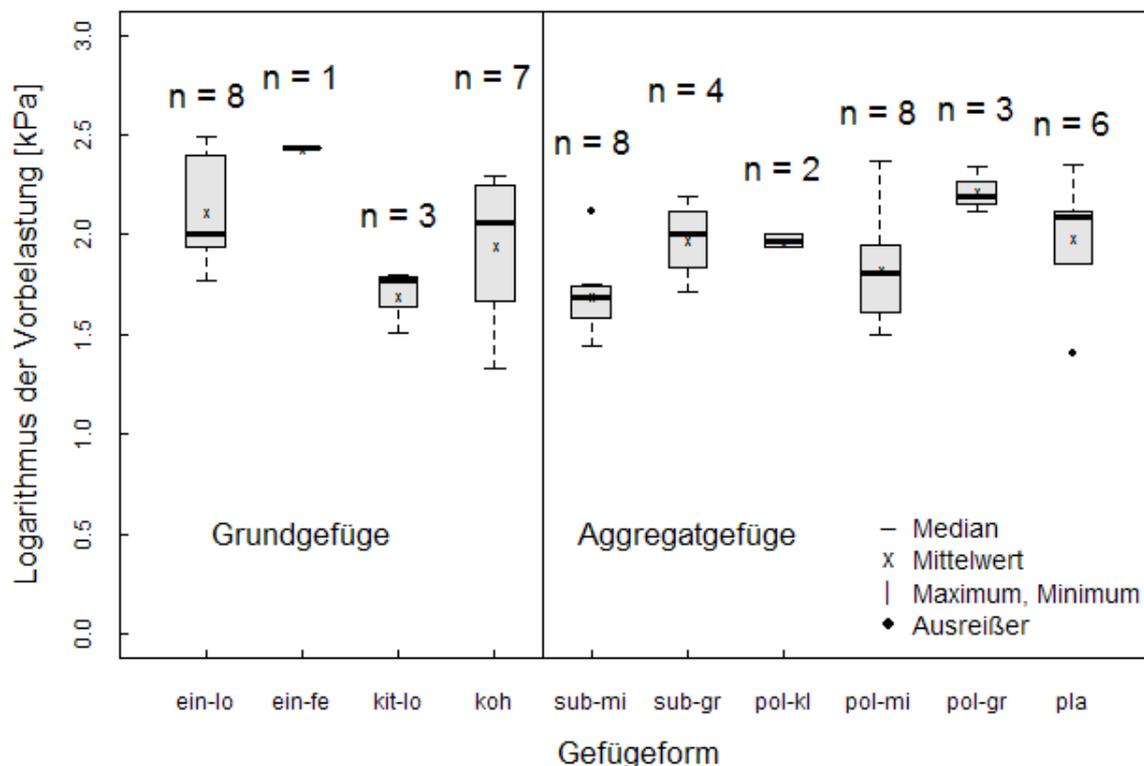
Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa] auf Tonböden.

Die Korrelationsanalyse von Zusammenhängen zwischen den Einzelparametern der visuellen Gefügeansprache und der mechanischen Vorbelastung über alle Bodenarten (Tabelle 5.1-2) zeigt, dass vornehmlich die Wurzelverteilung ( $r_s = 0,61^{**}$ ), der Verfestigungsgrad ( $r_s = 0,45^{**}$ ) und die Lagerungsart der Aggregate ( $r_s = 0,41^*$ ) für die Ableitung der Vorbelastung von Bedeutung sind. Demgegenüber besitzen der mechanische Widerstand ( $r_s = 0,36^*$ ), die biogenen Makroporen ( $r_s = 0,35^*$ ) und die Aggregatgröße ( $r_s = 0,28$ ) nur einen geringeren Aussagewert. Innerhalb der vier Bodenartengruppen ist die Korrelation mit der Wurzelverteilung nur noch auf den Sanden ( $r_s = 0,73^{**}$ ) und Schluffen ( $r_s = 0,59^*$ ) signifikant. Bei den Schluffvarianten ist zudem ein signifikanter Zusammenhang mit dem Verfestigungsgrad  $r_s = 0,53^*$  zu erkennen. Auf den Tonböden sind die Korrelationsmaße für den Verfestigungsgrad ( $r_s = 0,69$ ), die Aggregatgröße ( $r_s = 0,68$ ), den mechanischen Widerstand ( $r_s = 0,50$ ) und die Wurzelverteilung ( $r_s = 0,48$ ) zwar recht hoch, allerdings auf Grund des geringen Stichprobenumfangs nicht signifikant. Bei den Lehm Böden korreliert kein einzelner Parameter mit der mechanischen Vorbelastung.

**Tabelle 5.1-2:** Übersicht über die Korrelationsmaße (rs) der Zusammenhänge von sensorischen Parametern und mechanischer Vorbelastung [log kPa], gepoolte Spearman Rangkorrelation, \*signifikant bei  $\alpha = 0,05$ , \*\*signifikant bei  $\alpha = 0.01$

Messwert	mechanische Vorbelastung				
	Lehme n = 16	Sande n = 12	Tone n = 7	Schluffe n = 15	Gesamt alle Boden- gruppen
Lagerung der Aggregate	0,37	-	0,40	0,46*	0,41*
Verfestigungsgrad	0,29	0,45	0,69	0,53*	0,45**
Aggregatgröße	0,28	-	0,68	0,22	0,28
Wurzelverteilung	0,22	0,73**	0,48	0,59*	0,61**
Biog. Makroporen	0,23	0,28	0,11	0,33	0,35*
Mechan. Widerstand	0,30	0,35	0,50	0,55*	0,36*

Auch zwischen der Gefügeform und der mechanischen Vorbelastung sind nur schwache Zusammenhänge ersichtlich (Abbildung 5.1-4). So weisen subpolyedrische Gefüge im Mittel nur etwas geringere Vorbelastungswerte als polyedrische Gefüge auf, und diese wiederum besitzen nur etwas geringere Werte als die plattigen Gefüge. Wird jedoch innerhalb der Gefügeformen noch nach Größe differenziert, dann nimmt die Vorbelastung mit der Aggregatgröße zu.



**Abbildung 5.1-4:** Zusammenhang der ermittelten Gefügeformen mit den logarithmierten Werten der mechanischen Vorbelastung [kPa].

### 5.1.3.2 Luftkapazität

Im Gegensatz zur mechanischen Vorbelastung nimmt die Luftkapazität über alle untersuchten Standorte mit steigender Boniturnote in einem linearen Trend ab (Abbildung 5.1-5a und Abbildung 5.1-5b). Bei Note 1 liegt die Luftkapazität im Mittel zwischen 12 Vol% (Diez-Schema) und 17 Vol% (Packungsdichte-Schema) und bei Note 2 im Bereich von 11 Vol% (Diez-Schema) bzw. 13 Vol% (Packungsdichte-Schema). Damit sind die Luftkapazitäten bei diesen Noten des Diez-Schemas insgesamt etwas niedriger als im Packungsdichte-Schema. Bei den Boniturnoten 3 und 4 betragen die Luftkapazitäten nach Diez-Schema im Mittel um 9 Vol% bzw. 7 Vol% und nach PD-Schema um 8 Vol% bzw. 7,5 Vol%. Die Standardabweichung ist bei allen Noten erheblich und liegt im Bereich von  $\pm 5,8$  bis zu  $\pm 7,0$  Vol%. Die hohen Standardabweichungen bei der Gesamtbetrachtung aller Standorte erklären sich auch aus dem sehr differenzierten Verhalten innerhalb der Bodenartengruppen. Auch deshalb betragen die gepoolten Spearman-Korrelationskoeffizienten insgesamt nur  $-0,36^*$  (Diez-Schema) bzw.  $-0,47^{**}$  (Packungsdichte-Schema). Lässt man die Sandböden bei dieser Betrachtung außen vor ( $n = 38$ ), verändert sich der Korrelationskoeffizient zu  $-0,49^{**}$  (Diez-Schema) bzw.  $-0,55^{**}$  (Packungsdichte-Schema).

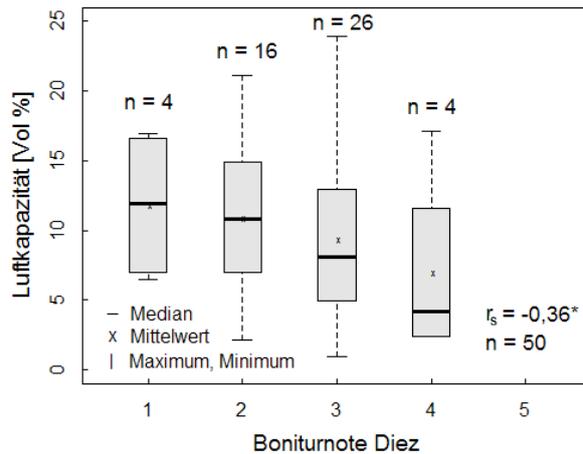


Abbildung 5.1-5a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Diez-Schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf allen Böden.

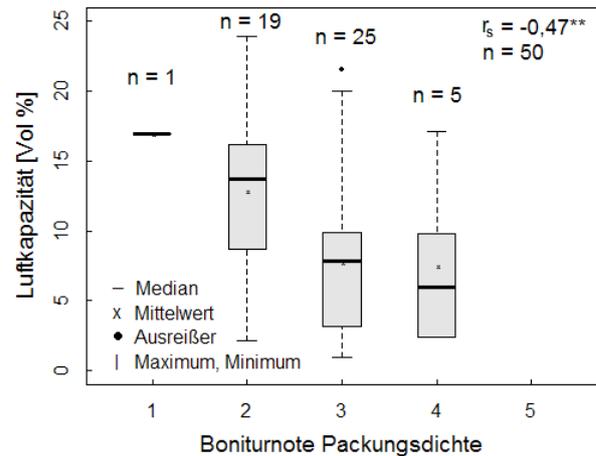


Abbildung 5.1-5b:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-Schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf allen Böden.

Eine Auflösung in die Bodenartengruppen soll exemplarisch wiederum am Packungsdichte-Schema erfolgen (Abbildung 5.1-6a - Abbildung 5.1-6d). Es fällt zunächst auf, dass die Sandböden unabhängig von der Boniturnote mittlere Luftkapazitäten von 15 - 17 Vol% aufweisen. Ein klarer Trend ist nicht erkennbar. Ähnlich verhalten sich die Lehm Böden. Auch hier ist der Trend nur sehr schwach ausgeprägt. Die Luftkapazität liegt jedoch im Mittel nur auf dem halben Niveau der Sandböden (6 – 9 Vol%). Selbst bei Note 2 beträgt die mittlere Luftkapazität nur knapp 8 Vol%. Auf den Tonböden liegen die Werte schon ab Note 3 unter 5 Vol%. Eine klare Trendabschätzung gestaltet sich aufgrund der geringen Anzahl an Werten insbesondere bei den Noten 2 und 4 jedoch schwierig. Am deutlichsten lässt sich die Luftkapazität anhand der Packungsdichte-Stufen bei den Schluffböden reproduzieren. Die Abstufung ist vergleichbar mit der Gesamtbetrachtung aller Böden. So werden bei Note 3 im Durchschnitt 8 Vol% und bei Note 4 rund 4 Vol% Luftkapazität ermittelt. Auch die Standardabweichung ist mit  $\pm 3,8\text{Vol}\%$  vergleichsweise gering.

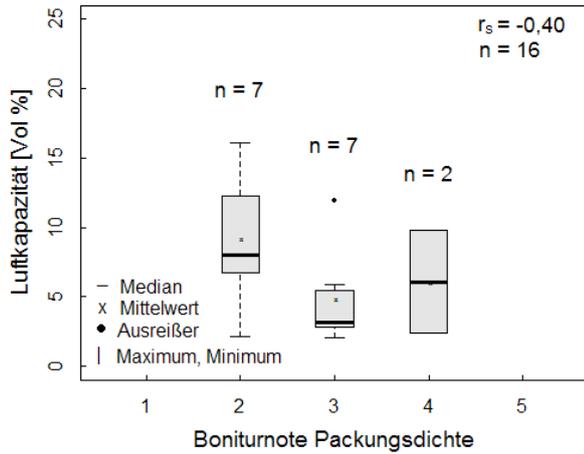


Abbildung 5.1-6a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf Lehmboeden.

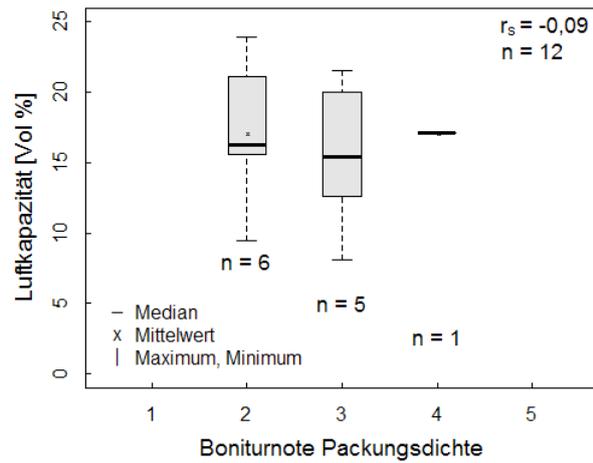


Abbildung 5.1-6b:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf Sandboeden.

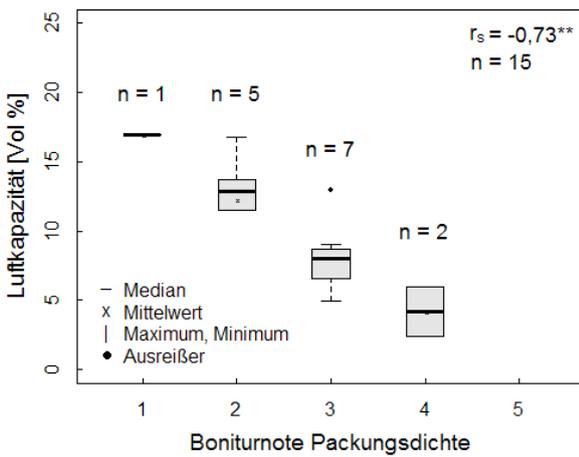


Abbildung 5.1-6c:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf Schluffboeden.

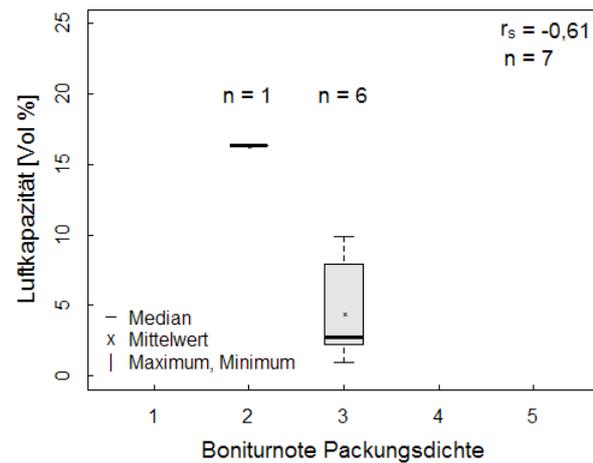


Abbildung 5.1-6d:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den Werten der Luftkapazität [Vol%] auf Tonboeden.

Die Betrachtung der Einzelparameter der visuellen Gefügeansprache (Tabelle 5.1-2) über alle Bodenartenhauptgruppen zeigt deutliche Zusammenhänge zwischen der Lagerung der Aggregate ( $r_s = -0,63^{**}$ ), dem Verfestigungsgrad ( $r_s = -0,59^{**}$ ), der Aggregatgröße ( $r_s = -0,47^{**}$ ) sowie dem mechanischen Widerstand ( $r_s = -0,46^{**}$ ) mit der Luftkapazität. Insbesondere die Lagerung der Aggregate ist für die Luftkapazität aggregierter Böden maßgebend. Liegen die Aggregate offen zueinander, beträgt die Luftkapazität im Mittel 14,2 Vol%. Bei halboffener Lagerung werden Luftkapazitäten von 7,8 Vol% ermittelt und bei fast geschlossener Lagerung liegen die Werte der Luftkapazität um 5,4 Vol%. Kaum Rückschlüsse

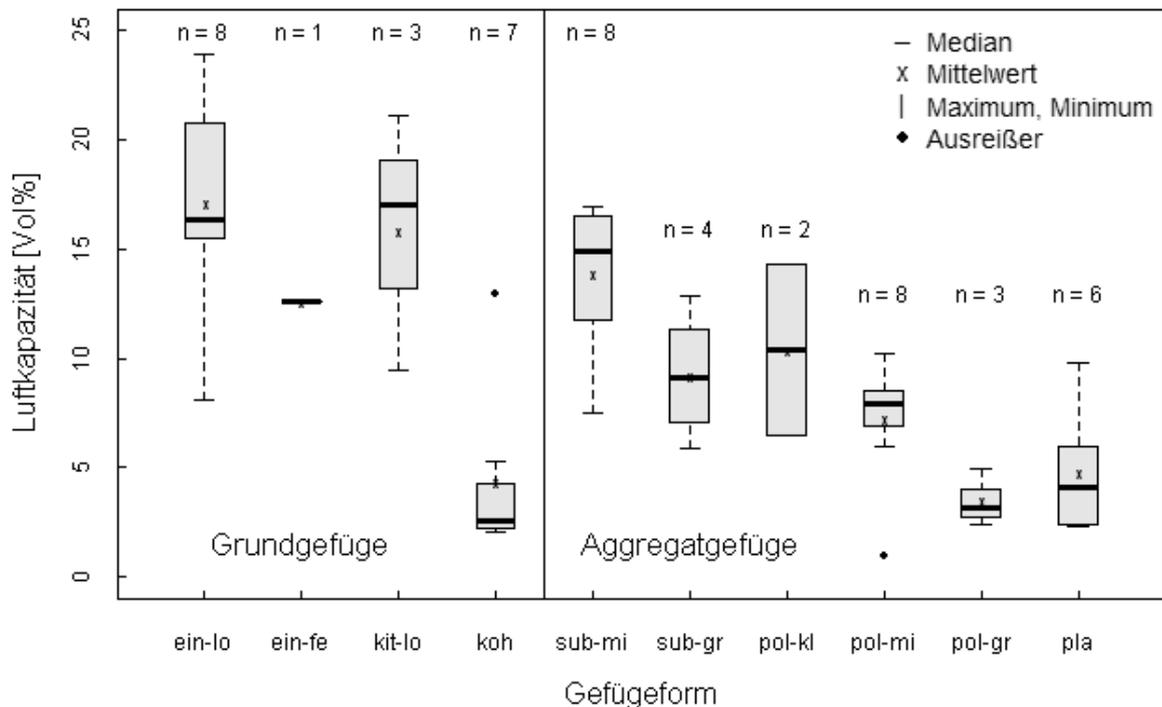
lassen sich auf die Luftkapazität des Bodens anhand der Wurzelverteilung ( $r_s = -0,40^*$ ) und der biogenen Makroporen ( $r_s = -0,26$ ) ziehen.

Die Aufschlüsselung nach Bodenarten (Tabelle 5.1-3) zeigt nur sehr niedrige Korrelationen der Einzelparameter innerhalb der Sandböden. Am besten können auf Lehm Böden Rückschlüsse auf die Luftkapazität anhand der Lagerung der Aggregate ( $r_s = -0,69^{**}$ ), des Verfestigungsgrades ( $r_s = -0,70^{**}$ ) und der Aggregatgröße ( $r_s = -0,80^{**}$ ) gezogen werden. Auf Schluffböden spielt hingegen neben der Lagerung der Aggregate ( $r_s = -0,58^*$ ) und dem Verfestigungsgrad ( $r_s = -0,63^*$ ) auch die Wurzelverteilung ( $r_s = -0,64^{**}$ ) eine bedeutende Rolle.

**Tabelle 5.1-3:** Übersicht über die Korrelationsmaße ( $r_s$ ) der Zusammenhänge von sensorischen Parametern und Luftkapazität [Vol%], gepoolte Spearman Rangkorrelation, \*signifikant bei  $\alpha = 0,05$ , \*\*signifikant bei  $\alpha = 0,01$

Messwert	Luftkapazität				
	Lehme n = 16	Sande n = 12	Tone n = 7	Schluffe n = 15	Gesamt alle Bodengruppen
Bonitur (1-5)					
Lagerung der Aggregate	-0,69**	-	-0,40	-0,58*	-0,63**
Verfestigungsgrad	-0,70**	-0,23	-0,47	-0,63*	-0,59**
Aggregatgröße	-0,80**	-	-0,65	-0,02	-0,47**
Wurzelverteilung	-0,47*	-0,07	-0,40	-0,64**	-0,40*
Biog. Makroporen	-0,27	0,05	-0,59	-0,38	-0,26
Mechan. Widerstand	-0,46*	-0,20	-0,69	-0,57*	-0,46**

Bei den Gefügeformen sind Unterschiede zwischen den Grundgefügen und den aggregierten Gefügen zu erkennen (Abbildung 5.1-7). Die Grundgefüge besitzen mit Ausnahme von kohärenten Gefügen durchweg höhere Luftkapazitäten um etwa 16,0 Vol%. Innerhalb der Aggregatgefüge nimmt die Luftkapazität mit zunehmender Kantigkeit und Größe der Gefügekörper ab. Große Polyeder weisen Luftkapazitäten von durchschnittlich 3,5 Vol% auf. Plattige Gefüge besitzen Luftkapazitäten um 6,0 Vol% und mittelgroße Polyeder sowie große Subpolyeder liegen um 8,0 Vol%. Bei den mittelgroßen Subpolyedern liegt die Luftkapazität mit durchschnittlich 13,4 Vol% vergleichsweise hoch.



**Abbildung 5.1-7:** Zusammenhang der ermittelten Gefügestruktur mit den Werten der Luftkapazität [Vol%].

### 5.1.3.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Analog zur Luftkapazität nehmen auch die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit mit der Zunahme der Boniturnote ab (Abbildung 5.1-8a und Abbildung 5.1-8b). Die gepoolten Spearman-Korrelationskoeffizienten betragen für alle Bodenartengruppen  $-0,56^{**}$  (Diez-Schema) und  $0,57^{**}$  (Packungsdichte-Schema). Im Mittel liegen die gesättigten Wasserleitfähigkeiten bei Note 1 im Diez-Schema bei  $158 \text{ cm d}^{-1}$  (log 2,2) und im Packungsdichte-Schema bei  $630 \text{ cm d}^{-1}$  (log 2,8). In letzterem wurde allerdings nur eine Probe mit der Note 1 untersucht. Bei Note 2 werden mittlere Werte von  $50 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,7) mit dem Diez-Schema bzw. von  $74 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,87) im Packungsdichte-Schema bestimmt. Bei Note 3 und 4 liegen die Werte für die Diez-Methode bei  $20 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,3) bzw. bei  $10 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,0) und für die PD-Methode bei  $14 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,16) bzw.  $12 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,07).

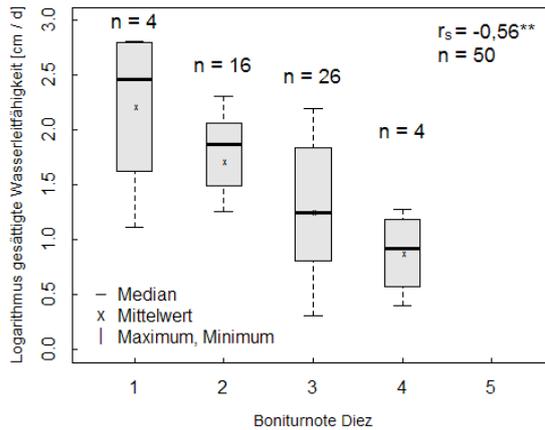


Abbildung 5.1-8a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Diez-Schema mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm d}^{-1}$ ] auf allen Böden.

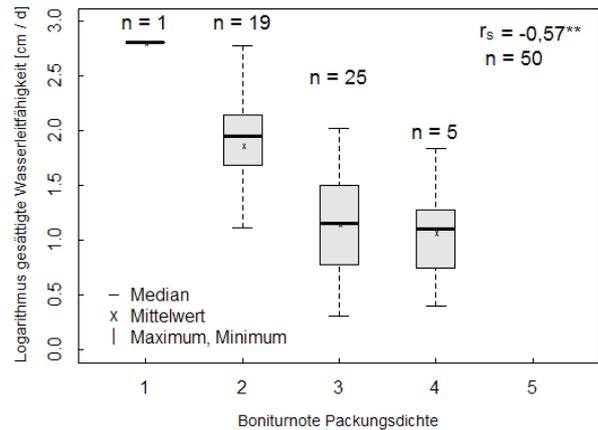


Abbildung 5.1-8b:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-Schemas mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm d}^{-1}$ ] auf allen Böden.

Eine Betrachtung der jeweiligen Bodenartengruppen deutet wiederum texturbedingte Unterschiede beim Zusammenhang von gesättigter Wasserleitfähigkeit und Packungsdichtenote an (Abbildung 5.1-9a bis Abbildung 5.1-9d). Bei den Lehmböden ist kein eindeutiger Trend zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Boniturnote feststellbar ( $r_s = -0,33$ ). Im Mittel liegen die Werte durchweg über  $10 \text{ cm d}^{-1}$  ( $\log 1,0$ ). Die Standardabweichungen sind mit  $\log \pm 0,54$  bis  $\log \pm 0,77$  höher als bei den anderen Bodenartengruppen. Auf den Sandböden nimmt die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit steigender Boniturnote ab ( $r_s = -0,75^{**}$ ). Der Parameter reagiert somit auf Sandböden stärker als die Luftkapazität. Bei Note 4 liegt die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit  $19 \text{ cm d}^{-1}$  ( $\log 1,28$ ) jedoch noch vergleichsweise hoch. Ton- ( $r_s = -0,61$ ) und Schluffböden ( $r_s = -0,77^{**}$ ) zeigen ebenso einen deutlicheren Trend zwischen Boniturnote und gesättigter Wasserleitfähigkeit. Bei Note 4 werden mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeiten von  $\leq 10 \text{ cm d}^{-1}$  ( $\log 1$ ) gemessen.

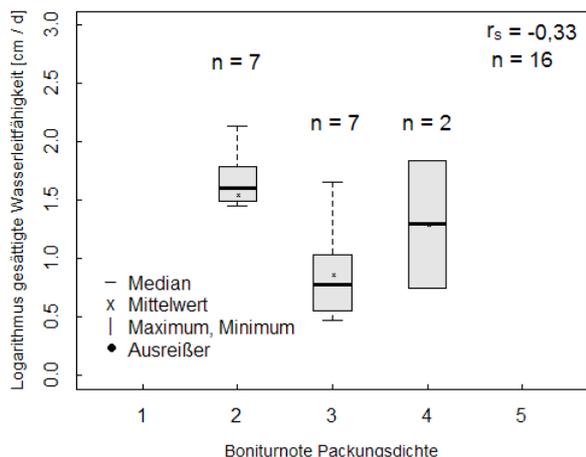


Abbildung 5.1-9a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [cm d<sup>-1</sup>] auf Lehm Böden.

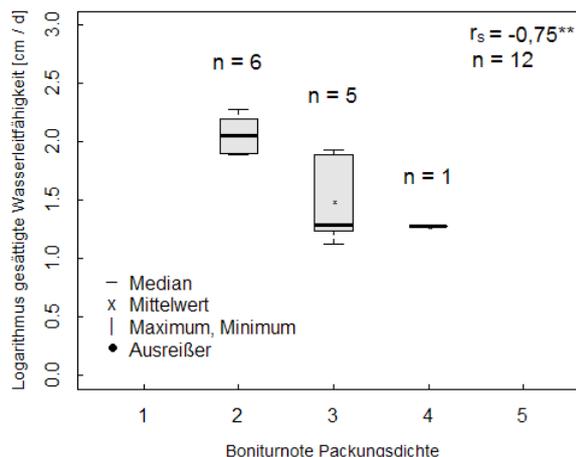


Abbildung 5.1-9b:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [cm d<sup>-1</sup>] auf Sandböden.

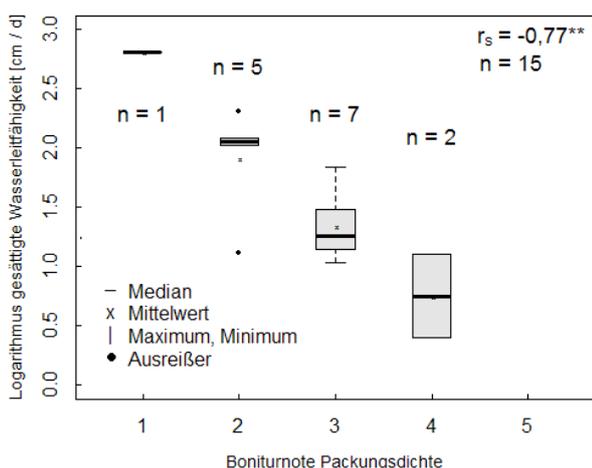


Abbildung 5.1-9c:

Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [cm d<sup>-1</sup>] auf Schluffböden.

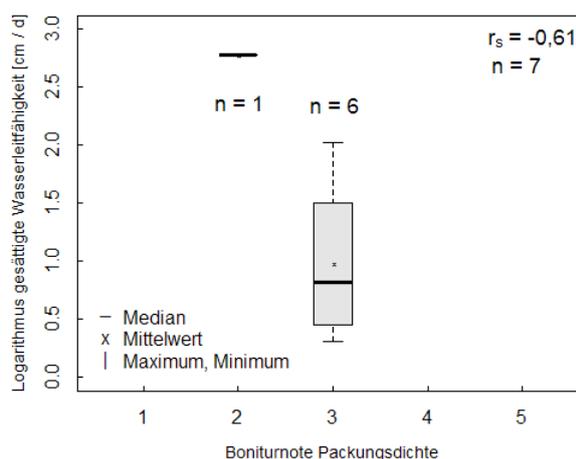


Abbildung 5.1-9d:

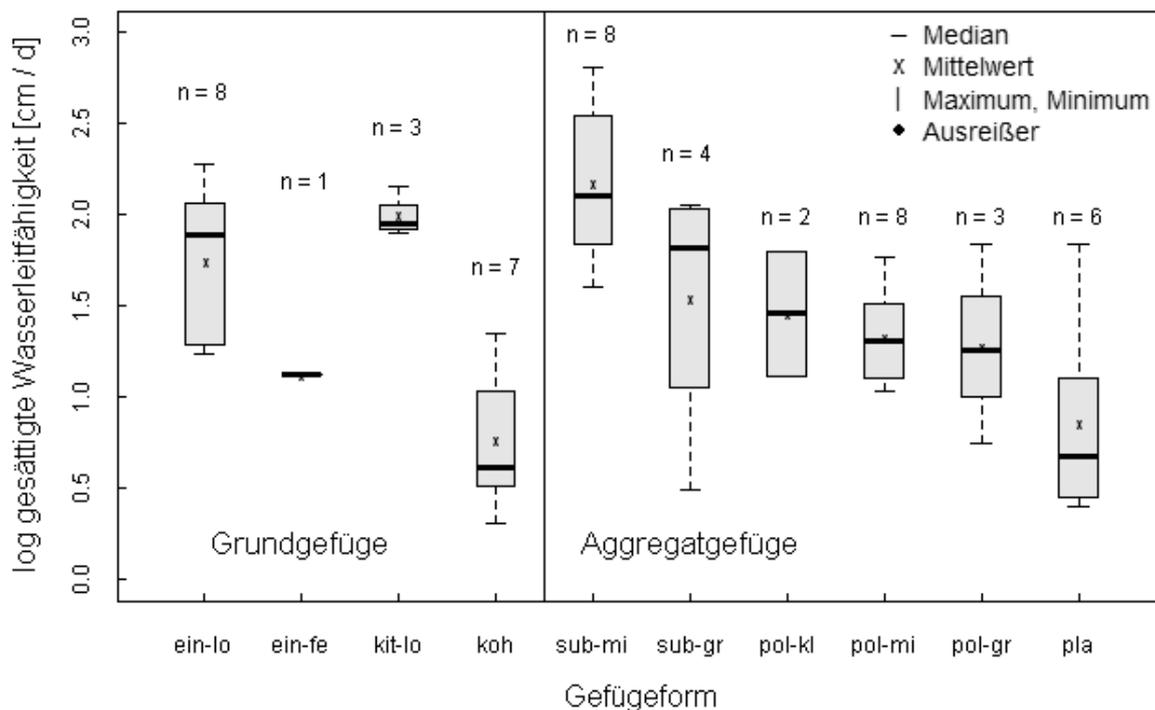
Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichte-schemas mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [cm d<sup>-1</sup>] auf Tonböden.

Der kf-Wert korreliert über alle Bodenartenhauptgruppen gut mit der Lagerung der Aggregate ( $r_s = -0,54^{**}$ ) und mit der Wurzelverteilung ( $r_s = -0,43^{**}$ ). Im Gegensatz dazu spielen für die Herleitung der gesättigten Wasserleitfähigkeit die Parameter Verfestigungsgrad ( $r_s = -0,41^*$ ), biogene Makroporen ( $r_s = -0,38^*$ ), mechanischer Widerstand ( $r_s = -0,38^*$ ) und Aggregatgröße ( $r_s = -0,29$ ) nur eine untergeordnete Rolle. Innerhalb der Bodenartengruppen Lehme und Tone zeigen sich mit keinem der einzelnen Parameter Zusammenhänge. Auf Sandböden korreliert nur die Wurzelverteilung ( $r_s = -0,73^{**}$ ) mit der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Auf den Schluffböden stehen die Lagerung der Aggregate ( $r_s = -0,85^{**}$ ) und die biogenen Makroporen ( $r_s = -0,65^{**}$ ) in nachweisbarer Beziehung zum kf-Wert.

**Tabelle 5.1-4:** Übersicht über die Korrelationsmaße ( $r_s$ ) der Zusammenhänge von sensorischen Parametern und gesättigter Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm d}^{-1}$ ], gepoolte Spearman Rangkorrelation, \*signifikant bei  $\alpha = 0,05$ , \*\*signifikant bei  $\alpha = 0,01$

Messwert	gesättigte Wasserleitfähigkeit				
	Lehme n = 16	Sande n = 12	Tone n = 7	Schluffe n = 15	Gesamt alle Boden- gruppen
Lagerung der Aggregate	-0,29	-	-0,53	-0,85**	-0,54**
Verfestigungsgrad	-0,42	-0,38	-0,57	-0,39	-0,41*
Aggregatgröße	-0,40	-	-0,41	-0,13	-0,29
Wurzelverteilung	-0,13	-0,73**	-0,26	-0,44	-0,43**
Biog. Makroporen	-0,33	-0,05	-0,49	-0,65**	-0,38*
Mechan. Widerstand	-0,26	-0,44	-0,58	-0,47*	-0,38*

Plattige und kohärente Gefüge weisen die niedrigsten  $k_f$ -Werte auf. Sie liegen im Mittel bei  $16 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,2) bzw.  $8 \text{ cm d}^{-1}$  (log 0,9) (Abbildung 5.1-10). Dem gegenüber weisen die Varianten mit losem und verkittetem Einzelkorngefüge sowie mit mittelgroßem Subpolyedergefüge sehr hohe  $k_f$ -Werte auf. Diese bewegen sich im Bereich von  $56 \text{ cm d}^{-1}$  bis  $100 \text{ cm d}^{-1}$  (log 1,75 - 2,0) bzw. von  $120 \text{ cm d}^{-1}$  (log 2,1). Analog zur Luftkapazität ist innerhalb der aggregierten Gefügeformen ein Trend zur Abnahme des  $k_f$ -Wertes mit zunehmender Kantigkeit und Größe der Gefügekörper zu erkennen.



**Abbildung 5.1-10:** Zusammenhang der Gefügeform mit den logarithmierten Werten der gesättigten Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm d}^{-1}$ ].

#### 5.1.3.4 Effektive Lagerungsdichte

Die effektive Lagerungsdichte bietet die einfache Möglichkeit, texturbedingte Niveauunterschiede beider Trockenrohdichte anzugleichen. Deshalb wird auf eine gesonderte Betrachtung einzelner Bodenarten-Gruppen verzichtet und in den Abbildungen 5.1-11a und 5.1-11b nur die Zusammenfassung aller Standorte für beide Schemata gezeigt. Mit zunehmender Boniturnote nimmt auch die effektive Lagerungsdichte deutlich zu. Die gepoolten Spearman-Korrelationskoeffizienten betragen insgesamt allerdings  $0,62^{**}$  (Diez-Schema) bzw.  $0,66^{**}$  (Packungsdichte-Schema). Analog zu allen bisher beschriebenen physikalischen Bodenparametern gibt es bei den Noten 1 und 2 wieder Unterschiede zwischen den Schemata. Im Mittel liegen die effektiven Lagerungsdichten beim Packungsdichte-Schema für Note 1 bei  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$  und bei Note 2 bei  $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ . Innerhalb des Diez-Schemas wurden Werte von  $1,50 \text{ g cm}^{-3}$  bei Note 1 und  $1,56 \text{ g cm}^{-3}$  bei Note 2 ermittelt. Bei den Noten 3 und 4 gleichen sich die Schemata an und zeigen jeweils Mittelwerte von  $1,73 \text{ g cm}^{-3}$  bei Note 3 und  $1,77 \text{ g cm}^{-3}$  bei Note 4.

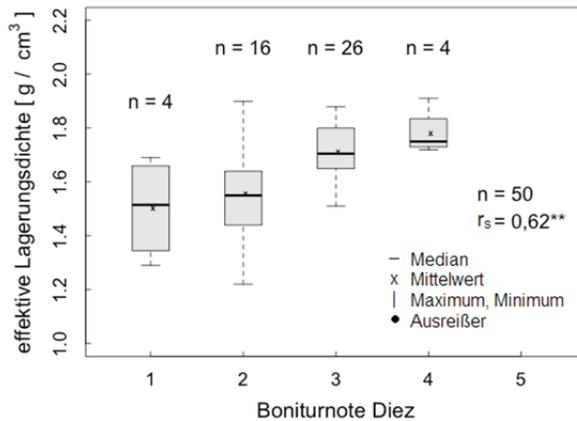


Abbildung 5.1-11a:

Zusammenhang der Boniturnoten des Diez-Schemas mit den Werten der effektiven Lagerungsdichte [ $\text{g cm}^{-3}$ ] auf allen Böden.

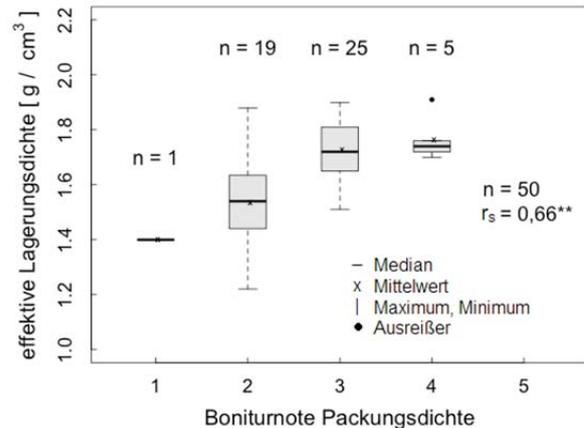


Abbildung 5.1-11b:

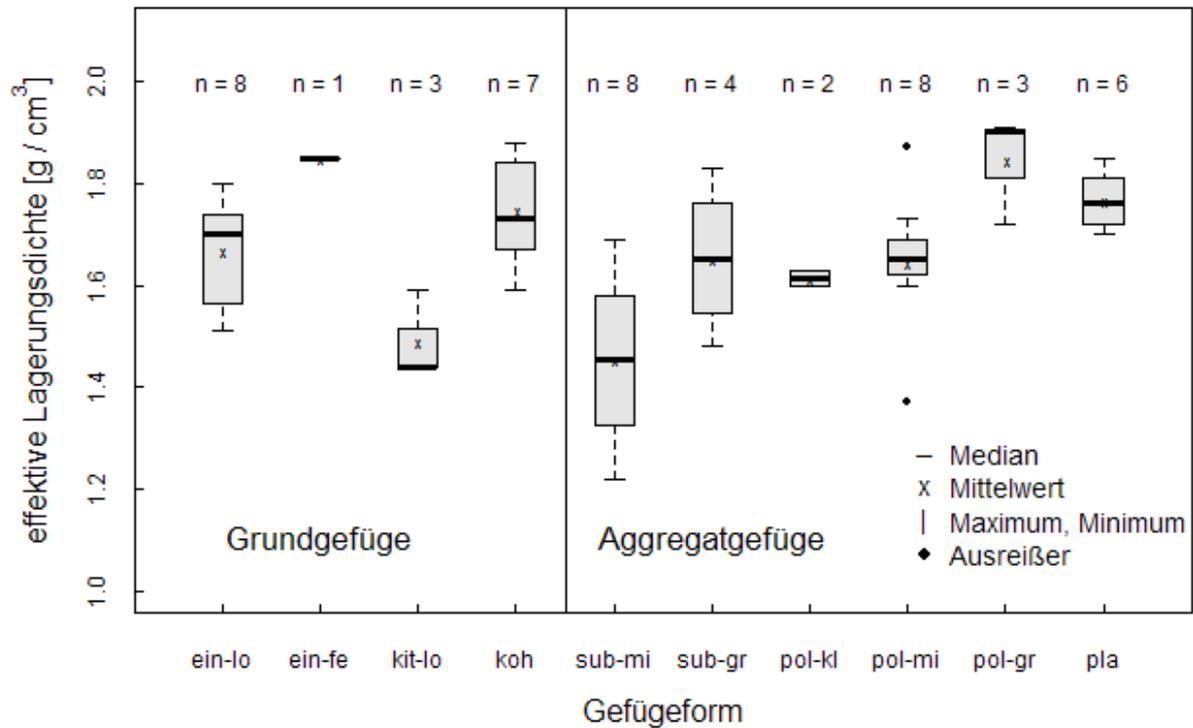
Zusammenhang der Boniturnoten des Packungsdichteschemas mit den Werten der effektiven Lagerungsdichte [ $\text{g cm}^{-3}$ ] auf allen Böden.

Im Vergleich mit den anderen physikalischen Bodeneigenschaften korrelieren zahlreiche Einzelparameter der visuellen Gefügebönetur sehr gut mit der effektiven Lagerungsdichte. Dies trifft insbesondere auf die Lagerung der Aggregate ( $r_s = 0,72^{**}$ ), die Wurzelverteilung ( $r_s = 0,71^{**}$ ) und die Aggregatgröße ( $r_s = 0,60^{**}$ ) zu. Mittlere Korrelationen wurden für den Verfestigungsgrad ( $r_s = 0,55^{**}$ ), den mechanischen Widerstand ( $r_s = 0,52^{**}$ ) und die biogenen Makroporen ( $r_s = 0,39^*$ ) ermittelt. Obwohl der Tongehalt in die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte einfließt, verhalten sich die Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Bodenartenhauptgruppen doch etwas differenzierter. Auf den Sandböden zeigt lediglich die Wurzelverteilung einen sehr engen Zusammenhang zur effektiven Lagerungsdichte ( $r_s = 0,71^{**}$ ). Auf den Tonböden korreliert der mechanische Widerstand ( $r_s = 0,81^{**}$ ) dagegen sehr gut.

**Tabelle 5.1-5:** Übersicht über die Korrelationsmaße ( $r_s$ ) der Zusammenhänge von sensorischen Parametern und der effektiven Lagerungsdichte [ $\text{g cm}^{-3}$ ], gepoolte Spearman Rangkorrelation, \*signifikant bei  $\alpha = 0,05$ , \*\*signifikant bei  $\alpha = 0.01$

Messwert	effektive Lagerungsdichte				
	Lehme n = 16	Sande n = 12	Tone n = 7	Schluffe n = 15	Gesamt alle Boden- gruppen
Lagerung der Aggregate	0,79**	-	0,40	0,67**	0,72**
Verfestigungsgrad	0,61**	0,45	0,47	0,72**	0,55**
Aggregatgröße	0,81**	-	0,65	0,33	0,60**
Wurzelverteilung	0,72**	0,71**	0,27	0,76**	0,71**
Biog. Makroporen	0,29	0,19	0,69	0,58*	0,39*
Mechan. Widerstand	0,50	0,32	0,81*	0,61*	0,52**

Die Gefügestärke gibt gute Hinweise auf die effektive Lagerungsdichte (Abbildung 5.1-12). Mit zunehmender Kantigkeit und Größe der Aggregate nimmt die effektive Lagerungsdichte zu. Insbesondere Plattengefüge und große Polyeder weisen mit Mittelwerten von  $1,77 \text{ g cm}^{-3}$  bzw.  $1,84 \text{ g cm}^{-3}$  sehr hohe Werte auf. Die Varianten mit kohärentem Gefüge liegen im Mittel bei  $1,74 \text{ g cm}^{-3}$ . Die Spannbreite ist dabei aber größer als bei plattigen und grobpolyedrischen Gefügen.



**Abbildung 5.1-12:** Zusammenhang der Gefügeform mit den Werten der effektiven Lagerungsdichte [g/cm<sup>3</sup>].

## 5.1.4 Diskussion

### 5.1.4.1 Eignung der Schemata zur Ableitung von Schadverdichtungszuständen

Die einfache Erfassung und Bewertung der Bodenstruktur mit Hilfsmitteln wie dem Spaten wurde schon sehr früh in der Geschichte des modernen Ackerbaus beschrieben (Görbing, 1947) und bis in die jüngste Vergangenheit weiterentwickelt (u.a. Beste, 2003; Weyer und Boeddinghaus, 2009). Das Ziel aller Arbeiten bestand in der Beurteilung der Bodenstruktur für optimales Wachstum der Kulturpflanzen. Nach heutigen Maßstäben sollte sich die Aussagefähigkeit der visuellen Methoden an physikalisch begründeten und exakt messbaren Kenndaten des Bodengefüges orientieren. Um den wurzelökologischen Ansprüchen der Pflanzen zu genügen, sollte ein Boden danach in der Ackerkrume eine Luftkapazität von mindestens 8 Vol% und im Unterboden von mindestens 5 Vol% aufweisen (Blume und Schlichting, 1966; Stepniewski et al., 1994; Lebert et al., 2004; Paul, 2004). Ebenso sollte eine Infiltrationsleistung in Form der gesättigten Wasserleitfähigkeit von 10 cm d<sup>-1</sup> (Lebert et al., 2004) gewährleistet sein und eine effektive Lagerungsdichte von 1,70 g cm<sup>-3</sup> (Beylich et al., 2010) nicht überschritten werden.

Die standortübergreifende Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit ergibt, dass die physikalischen Messwerte im Mittel bei Boniturnote 3 und unabhängig vom verwandten Schema noch diesen Mindestanforderungen genügen und bei Note 4 leicht darunter bzw. darüber liegen. Innerhalb der einzelnen Bodenartengruppen bestehen jedoch erhebliche Unterschiede.

Auf Lehmböden unterschreiten die Messwerte der Luftkapazität und der effektiven Lagerungsdichte schon ab Note 3 die Mindestanforderungen. Jedoch liegt die gesättigte Wasserleitfähigkeit bei Note 4 noch deutlich über  $10 \text{ cm d}^{-1}$ . Dies zeigt, dass die wenigen vorhandenen Grobporen auf diesen Böden sehr kontinuierlich sind.

Auf Sandböden wird die Luftkapazität nur geringfügig negativ durch dichtere Lagerung und mit zunehmender Boniturnote beeinflusst. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit dagegen schon und sie erweist sich damit als wesentlich sensiblerer Parameter. Dies verdeutlicht zunächst, dass auch auf Sandböden Grobporenvolumen und Porenkontinuität nicht gleich zu setzen sind. Auf bindigen Substraten wurde dies bereits von Werner und Thämert (1989) oder Ball et al. (1988) beobachtet. Insgesamt werden die Mindestanforderungen an die Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit auf Sandböden selbst bei Boniturnote 4 nicht unterschritten. Harrach (1999) beschreibt abweichende Beobachtungen auf Sandböden (Kippsubstrate). In seiner Arbeit sinken die Werte der Luftkapazitäten ab Note 4 unter den oben genannten Richtwert. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nimmt ebenfalls mit steigender Packungsdichtestufe ab, bleibt aber auch bei Note 5 noch in einem hohen Bereich. Eine Festlegung von Schadverdichtungszuständen anhand der Werte für die oben genannten physikalischen Laborparameter erscheint fraglich, weil Sandböden aufgrund ihrer großkörnigen Textur insgesamt ein deutlich höheres Niveau an Luftkapazität und gesättigter Wasserleitfähigkeit aufweisen (Blume, 1992) und diese damit vermutlich nicht limitierend für das Pflanzenwachstum sind. Bessere Hinweise liefert hier die effektive Lagerungsdichte die insgesamt für alle Böden bei Boniturnoten größer 3 mit Werten über  $1,70 \text{ g cm}^{-3}$  auf eine Schadverdichtung hinweist.

Für die Schluffböden werden die Schritte zwischen den Boniturnoten für alle physikalischen Messwerte am deutlichsten abgebildet und die Überschreitung der Mindestanforderungen kann mit der Boniturnote 4 sehr gut erfasst werden. Dies scheint vor dem Hintergrund, dass viele Untersuchungen zu Beziehungen zwischen Spatendiagnosenoten und bodenphysikalischen Messwerten bzw. dem Ertrag auf schluffreichen Lössböden stattfanden, plausibel (Dumbeck, 1986; Vorderbrügge, 1989; Werner und Thämert, 1989; Harrach und Vorderbrügge, 1991; Tenholtern, 2000; Hofmann, 2000; Rücknagel et al., 2009; Müller et al., 2009). Die Ursache für die Häufung könnte vornehmlich in der insgesamt großen Verbreitung schluffreicher Böden innerhalb der Ackerstandorte Deutschlands liegen. Zudem liegen die Wirkungsstätten der Entwickler der hier geprüften Schemata im südlichen und südwestlichen Teil Deutschlands, in dem Schluffböden einen noch stärkeren Flächenanteil ausmachen.

Auf Tonböden werden die Mindestanforderungen an die Luftkapazität und schon bei Note 3 unterschritten und die an die gesättigte Wasserleitfähigkeit grade noch erfüllt. In Analogie zu den Lehmböden sind die wenigen vorhanden Grobporen wiederum so kontinuierlich, dass sie das Wasser gut leiten.

Eine Konsequenz aus dem unterschiedlichen Verhalten der einzelnen Bodenartengruppen könnte die Anpassung der Schemata oder der Notenbewertung an unterschiedliche Standortbedingungen sein. Ein bereits bekanntes Beispiel dafür ist die Arbeit von Beste et al. (2001) mit Differenzierungen für sandige, lehmige und tonige Böden. In dieser wird zudem ein Aggregatsstabilitätstest in die Beurteilung mit eingebunden. Leider fehlen in den Arbeiten von Beste et al. (2001) und in Beste (2003) eine umfangreiche Begründung des Konzeptes mit bodenkundlichen Untersuchungen und die Validierung der Methode.

#### **5.1.4.2 Vorbelastung in Abhängigkeit von der Gefügebönetur und vom optimalen Gefügezustand**

Ein wesentliches Anliegen dieser Arbeit ist eine Einordnung der mechanischen Vorbelastung gemäß den Gefügezuständen, die die Mindestanforderungen an die physikalischen Parameter erfüllen. Ein Wert für die mechanische Vorbelastung, der eindeutig den Übergang zur Schadverdichtung kennzeichnet, ist nicht ermittelbar, weil sowohl die physikalischen Parameter als auch die visuelle Gefügebönetur zum Teil erheblichen Streuungen unterliegen. Die Arbeiten, die anhand von Trockenroh-dichtewerten, Modellen und Pedotransferfunktionen einzelnen Bodenartengruppen in 5 Lagerungsdichtestufen typische Vorbelastungswerte zuordnen sind in Vorderbrügge und Brunotte (2011) zusammengefasst. Sie dienen als Vergleich zu den hier vorliegenden Daten. Lebert (2010) nimmt die Einteilung der Klassen anhand der Klasseneinteilung der effektiven Lagerungsdichte resp. der Packungsdichte mit den Trockenroh-dichtewerten der jeweiligen Bodenart nach KA5 (AG Bodenkunde, 2000) und Vorderbrügge und Brunotte (2011) auf Basis von Literaturdaten vor.

Die mechanische Vorbelastung für Lehmböden bei Boniturnote 3 liegt mit  $\log 2,12$  (132 kPa) über dem Wert von 90 kPa, der von Horn und Fleige (2009), Vorderbrügge und Brunotte (2011) sowie Lebert (2010) bei der Lagerungsdichtestufe 3 (mittel) angenommen wird. Gleichzeitig werden die Anforderungen an die bodenphysikalischen Parameter auch nicht mehr erfüllt. Die Schluffe liegen mit  $\log 1,92$  (83 kPa) wiederum unter dem Wert von 120 kPa, der von Lebert (2010) und Vorderbrügge u. Brunotte (2011) diesen Böden bei mittlerer Lagerungsdichteklasse 3 zugewiesen wird. Ebenso verhält es sich bei den Tonböden. Auch hier wird eine Vorbelastung von 120 kPa in der Literatur (Lebert, 2010; Vorderbrügge und Brunotte 2011) der Klasse 3 zugeordnet. Dieser Wert wird in unseren Untersuchungen (Boniturnote 3 entspricht einer Vorbelastung von  $\log 2,01$  bzw. 102 kPa) unterschritten obwohl sich im Gegensatz dazu die Werte für Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit schon in einem ungenügenden Bereich befinden.

Die Bewertung der mechanischen Vorbelastung auf Sandböden ist insgesamt schwieriger, da sich hier die Sande mit homogenerer Körnunggröße von den Sanden mit heterogenerer Körnunggröße hinsichtlich ihres Verdichtungsverhaltens unterscheiden können (Kézdi, 1969). Davon abgesehen liegen die hier gemessenen Werte bei Boniturnote 3 mit  $\log 2,134$  (136 kPa) jedoch innerhalb der Vergleichswerte (108 - 214kPa), die von Lebert (2010) bzw. Vorderbrügge und Brunotte (2011) für Sandböden bei Klasse 3 angenommen werden.

#### **5.1.4.3 Bedeutung der Einzelparameter für die physikalischen Messwerte**

Die Ableitung der Boniturschemata und die Festlegung der Einzelparameter sowie deren Gewichtung innerhalb der Schemata basierten zumeist auf empirischen Überlegungen. Mit vorliegender Arbeit wurden für einzelne Bodenartengruppen systematisch statistische Zusammenhänge der Einzelparameter mit den physikalischen Messgrößen analysiert. Dies erlaubt die Identifikation derjenigen Parameter, welche die physikalischen Werte am deutlichsten abbilden.

## Mechanische Vorbelastung

Am besten korreliert sowohl innerhalb der Bodenartenhauptgruppen Sande und Schluffe als auch in einer Gesamtbetrachtung die Wurzelverteilung mit der mechanischen Vorbelastung. Das bestätigt zunächst die Wichtigkeit dieses sensiblen Parameters als Indikator für die Beurteilung des Bodengefüges. Die Pflanzenwurzel signalisiert vermutlich ähnlich wie ein Penetrometergerät den veränderten Bodewiderstand mit steigender mechanischer Vorbelastung. In Untersuchungen von Hartge und Bachmann (2004) wurde die Ableitung des Spannungszustandes im Boden anhand des Durchdringungswiderstandes bereits belegt. Verwunderlich ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass der sensorisch ermittelte mechanische Widerstand abgesehen von den Lehmböden nur eine sehr geringe statistische Bedeutung für die Vorbelastung besitzt. Die Bestimmung im Feld mit einem Messer oder Schraubenzieher scheint deutlich subjektiver verlaufen zu sein als bei den anderen Größen. In einem Schweizer Forschungsvorhaben hat sich dagegen der sogenannte „Schraubenziehertest“ als bewährtes Hilfsmittel zur Abschätzung der mechanischen Stabilität in der Ackerkrume bewährt (Spiess und Diserens, 2001). Eine weitere mögliche Erklärung für die Aussagekraft der Wurzelverteilung könnte darin liegen, dass Wurzeln im Gegensatz zum Penetrometer, Messer oder Schraubenzieher in der Lage sind, kleinsträumige Verdichtungen zu umgehen oder zur Seite zu schieben, wenn die Gefüge-lagerung oder Porosität genug Raum dafür lässt (Horn et al., 1987). Diese Optionen der Wurzeln sind auf nicht oder nur schwach aggregierten und kompakten Sandböden sehr eingeschränkt, weshalb die Wurzelverteilung besonders auf den Sandböden mit der mechanischen Vorbelastung korrelieren dürfte. Zudem gibt es auf Sandböden oft nur eine geringe Regenwurmaktivität und es existiert folglich ein nur wenig ausgeprägtes Netz von biogenen Poren, die als Alternative Wachstumsgänge von den Wurzeln genutzt werden könnten.

Die Lagerungsart der Aggregate und der Verfestigungsgrad haben vornehmlich auf den Schluffböden eine größere Bedeutung für die mechanische Vorbelastung, während die Analyse über alle Böden eher mäßige Effekte zeigt. In einem Modellansatz von Rücknagel et al. (2007) konnte jedoch belegt werden, dass das im Labor anhand der Aggregatdichte (AD) und der Trockenrohdichte (BD) ermittelte AD/BD-Verhältnis als Maß für die Lagerungsart der Aggregate ein wesentliches Kriterium für die Höhe der Vorbelastung darstellt. Die optisch begründete Festlegung der Lagerungsart im Feld ist wiederum sehr subjektiv und erreicht damit die hohe Genauigkeit des Laborergebnisses von Rücknagel et al. (2007) nicht. In stärker zeitlich und standörtlich auf rekultivierte Lössböden abgegrenzten Versuchen lassen sich dagegen gute Zusammenhänge zwischen der visuellen Gefügebewertung und dem AD/BD-Verhältnis belegen (Rücknagel et al., 2009). In der bodenkundlichen Literatur wird wiederkehrend über die Bedeutung der Gefügeform für die mechanische Vorbelastung berichtet. So zeigen die Untersuchungen von Fleige et al. (2002) Unterschiede zwischen der mechanischen Vorbelastung bei Krümelgefüge und bei polyedrischem oder kohärentem Gefüge. In den untersuchten Tiefenbereichen der Ackerstandorte in vorliegender Arbeit kommen Krümelgefüge jedoch nicht vor, da diese Gefügeform nur durch Lebendverbauung insbesondere in der oberen Krume entsteht. Von Lebert (1989) und Horn und Fleige (2009) wird auch eine zunehmende mechanische Stabilität in der Reihenfolge des Aggregierungsgrades der Gefügeformen kohärent < prismatisch < polyedrisch < subpolyedrisch beschrieben. Im Gegensatz dazu können anhand des hier vorliegenden Datensatzes keine Effekte der Gefügeform für die mechanische Vorbelastung beobachtet werden. Auch die Größe der Aggregate spielt keine Rolle für die Vorbelastung (Keller, 2011). Ebenso lassen sich zwischen der mechanischen Vorbelastung und den optisch erfassten biogenen Makroporen insgesamt nur sehr schwache Zusammenhänge erkennen.

Dies lässt sich damit begründen, dass selbst in mechanisch stabilen Böden kontinuierliche Makroporen vorhanden sein können (Passioura, 1991).

### **Luftkapazität**

Die Lagerung der Aggregate aber auch die aggregierten Gefügeformen korrespondieren gut mit der Luftkapazität. Die Scharfkantigkeit und Glattwandigkeit der Polyeder entsteht durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse der Tonteilchen (Blume, 1992) und nicht zwingend durch Druckbelastung. Lediglich die Größe und eine plattige Form der Aggregate sind durch Verdichtungsprozesse zu erklären. Die scharfen Kanten der Polyederaggregate schließen im gequollenen Zustand - wie er bei den Untersuchungen und während der Bonitur vorhanden war - sehr dicht aneinander. Die rauere Oberfläche der Subpolyeder verhindert dies bei gleicher Dichtelagerung. Deswegen sind bei gleicher Aggregatgröße die rauwandigen Subpolyeder besser zu bewerten. Die Streuung innerhalb der Gefügetypen ist dennoch zum Teil erheblich. Begründet kann dies damit werden, dass die Bodenstruktur und auch die Umsetzungs- und Aggregierungsprozesse einer gewissen Dynamik unterliegen. Selten findet man nur eine Aggregatform einer Größenkategorie. In dieser Untersuchung ist jeweils die dominierende Gefügeform erfasst worden.

Der Parameter Aggregatgröße weist im Gegensatz zu den Ton- und Lehmböden auf den Schluffböden keine Zusammenhänge auf. Das mag daran liegen, dass Schluffe eigentlich eine kohärente Struktur besitzen und bei hoher Bodenfeuchte wie sie zum Zeitpunkt der Untersuchung vorlag eine Art von „Scheinaggregaten“ ausgebildet hatten und es so zu Fehlbonituren in diesem Bereich kam.

Neben der Lagerung, der Form und der Größe der Aggregate gibt der Zusammenhalt (Verfestigungsgrad) der Aggregate Auskunft über den Lufthaushalt des Bodens. Lediglich auf den wenig aggregierten Sandböden trifft diese Aussage nicht zu. Die locker durch Lebendverbauung entstandenen Teilchen, die durch Wurzeln zusammengehalten werden, zerfallen aufgrund ihres sehr geringen Tongehaltes selbst bei hoher Dichtelagerung problemlos in Einzelkörner und wenige Aggregate.

### **Gesättigte Wasserleitfähigkeit**

Erkennbare Zusammenhänge zwischen den Einzelparametern und der gesättigten Wasserleitfähigkeit gab es nur wenige. Auffallend ist, dass auf den aggregierten Böden mit steigender Kantigkeit und Größe der Aggregate die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit sinken. Auch Müller et al. (2009) beschreiben stärkere Zusammenhänge zwischen Aggregateigenschaften, physikalischer Bodenqualität (Infiltrationsvermögen) und Ertrag. Allerdings wurden die Untersuchungen kurz nach der Ernte im Sommer durchgeführt und sowohl Regenwurmaufkommen als auch Wurzelwachstum konnten zu diesem Zeitpunkt nicht optimal erfasst werden.

Für die gesättigte Wasserleitfähigkeit spielt ein kontinuierliches Grobporensystem eine wichtige Rolle. Solche Poren entstehen vornehmlich durch Regenwurmaktivitäten. Ein Haupteinflussfaktor für Regenwurmaufkommen ist die Bodenfeuchte (Joschko et al., 2009). Daneben korreliert der Schluffgehalt mit der Besatzdichte (Edwards und Bohlen, 1996). So ist es nicht verwunderlich, dass auf den untersuchten Ton- und Schluffböden, die oft in sehr niederschlagsreichen Gegenden liegen, die höchsten kf-

Werte (bei guter Bodenstruktur (Note 2)) zu finden waren und sich auf diesen Böden gute Korrelationen mit dem Parameter biogene Makroporen aufzeigen. Das dies nicht für Lehm Böden zutrifft, lässt sich allerdings nicht erklären.

Neben den biogenen Makroporen hat die Lagerung der Aggregate auf den Schluffböden Einfluss auf das Infiltrationsvermögen. Bei einer offenen oder sperrigen Lagerung kann das Wasser gut einsickern. Bei einer geschlossenen Lagerung bieten lediglich die Makroporen einen Versickerungskanal. Ähnliche Beobachtungen machte Benecke (1966) auf bindigen Böden.

Weiterhin konnten gute Zusammenhänge zwischen dem mechanischen Widerstand auf den Schluffböden und der gesättigten Wasserleitfähigkeit dargestellt werden. Auch Hofmann (2000) fand bei seinen Untersuchungen auf einer Löß-Schwarzerde gute Zusammenhänge zwischen der dem mechanischem Widerstand, der mittels Handpenetrometer erhoben wurde und dem kf-Wert. Im Gegensatz zu dieser Untersuchung konnte er Zusammenhänge zur Wurzelverteilung auf diesen Schluffböden aufzeigen. Dieser Parameter korreliert in der vorliegenden Untersuchung lediglich auf den Sandböden mit dem kf-Wert. Der kf-Wert nimmt auf den Sandböden mit steigender Boniturnote ab, unterschreitet jedoch nicht die Mindestanforderungen (s. Abschnitt 5.1.2.1). Warum die Wurzeln so stark darauf reagieren lässt sich nicht erklären.

### **Effektive Lagerungsdichte**

Genau wie bei den Messwerten mechanische Vorbelastung und gesättigte Wasserleitfähigkeit korreliert auf den Sandböden lediglich die Wurzelverteilung mit der effektiven Lagerungsdichte. Generell bildet die Wurzelverteilung auf den Sandböden das Bild der Gesamtbonitur ab. Auch Ball und Douglas (2003) fanden auf sandigen Böden gute Zusammenhänge zwischen der Durchwurzelung und der Gesamtbodenstrukturbonitur. Neben den Sandböden nimmt die Wurzelverteilung aber auch auf den Lehm- und Schluffböden mit steigender Lagerungsdichte ab bzw. wird ungleichmäßiger. Mit steigender Dichte nehmen die Interaggregaträume ab und auch die Dichte der Aggregate selbst nimmt zu. So können die Wurzeln ab einer effektiven Lagerungsdichte von ca.  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$  die Aggregate weder umwachsen noch sie durchdringen (Beylich et al., 2010; Horn et al., 1987). So macht es Sinn, dass auch die Lagerung der Aggregate in engem Zusammenhang zur effektiven Lagerungsdichte steht. Daneben weisen der Verfestigungsgrad und der mechanische Widerstand auf gute Beziehungen hin. Auf den Ton- und Lehm Böden gibt zudem die Aggregatgröße Anhaltspunkte auf die effektive Lagerungsdichte.

Genau wie bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit zeigen die aggregierten Gefügeformen einen Trend auf. Mit steigender Kantigkeit und Größe der Aggregate nimmt die effektive Lagerungsdichte zu. Diese Beobachtung deckt sich mit Erkenntnissen aus Untersuchungen von Werner und Thämer (1989) und Gullich et al. (2010).

### **5.1.5 Schlussfolgerungen**

Die Spatendiagnose ist ein praktisches Instrument des physikalischen Bodenschutzes, das eine breite Anwendung erlaubt und aufwändige Laboruntersuchungen einzusparen hilft. Mit beiden hier untersuchten Schemata ist der Nachweis von Bodenschadverdichtungen beziehungsweise die Bewertung des

Gefügestand an sich gut möglich, obwohl sie den Schwerpunkt der Beurteilung auf unterschiedliche Einzelparameter legen. Sie kommen sogar zu ähnlichen Spannen für die physikalischen Bodenparameter bei gleicher Boniturnote.

Bei Boniturnote 3 werden auf den meisten Standorten die Mindestanforderungen gemessen an physikalischen Laborwerten noch hinreichend gut erfüllt. Die mittleren mechanischen Vorbelastungen bei dieser Boniturnote bewegen sich auf Schluff- und Tonböden in einem relativ engen Rahmen zwischen etwa 80 kPa und 110 kPa und auf den Sandböden um 135 kPa. Lediglich die Bewertung der Lehm Böden bei Note 3 mit einer Vorbelastung von 130 kPa entspricht nicht den Mindestansprüchen an den bodenphysikalischen Zustand.

Für die einzelnen Bodenartengruppen lassen sich spezifische Einzelmerkmale identifizieren, die insgesamt besonders gut mit den physikalischen und mechanischen Laborwerten korrelieren. So ist bei Lehm Böden besonders auf die Aggregatgröße, die Lagerung der Aggregate zueinander und auf den Verfestigungsgrad zu achten. Die Wurzelverteilung ist auf Sandböden das bedeutendste Einzelmerkmal. Auf Schluffböden sollte das Hauptaugenmerk auf der Lagerung der Aggregate, der Wurzelverteilung und dem Verfestigungsgrad liegen. Bei Tonböden ist die Bedeutung der einzelnen Gefügemerkmale wesentlich ausgeglichener. Hier sollte allen Parametern Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Gefügesteuerung ist auf allen Standorten ein wichtiges Merkmal. Eine Anpassung der Boniturschemata an differenzierte Standortbedingungen würde deren Genauigkeit vermutlich weiter verbessern.

#### **5.1.6 Bodenphysikalischer Zustand ökologischer und konventionell wirtschaftender Betriebe unterschiedlicher Standorte**

Neben der Betrachtung der Beziehungen zwischen bodenphysikalischen Messwerten und visuellen Gefügesteuerungen sollen an dieser Stelle die Ergebnisse der Laboranalysen und Gefügesteuerungen auf Systemebene (ökologisch/konventionell) dargestellt und bewertet werden.

Ein tiefreichendes und kontinuierliches Grobporensystem spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Bodenstruktur. Die Grobporen sind jedoch sehr verdichtungsempfindlich und können schnell zerstört oder unterbrochen werden. Im Folgenden sollen zwei Hypothesen anhand der vorliegenden Messwerte geprüft werden:

##### **Hypothesen:**

- (1) Im Ökologischen Landbau wird die Bodenstruktur durch systemtypische Maßnahmen, wie häufiges Befahren zur Unkrautregulierung, dem Ausbringen von organischem Dünger und dem vermehrten Anbau von Sommerfrüchten und der damit verbundenen Bewirtschaftung im Frühjahr, stärker beansprucht als im Konventionellen Landbau.
- (2) Durch den Anbau von tiefwurzelnden Leguminosen im ökologischen Landbau verbessern sich die Durchlüftung und die Infiltrationsrate in den Unterboden.

### 5.1.6.1 Material und Methoden

Alle Flächen waren zum Zeitpunkt der Probenahme mit Winterweizen bzw. Winterroggen bestellt. Die Untersuchungen fanden bis auf zwei Flächen im Frühjahr statt. Diese wurden im Herbst beprobt. Die Bodenwasserverhältnisse bewegten sich auf allen Flächen um die Feldkapazität ( $pF$  1,8, Matrixpotential von -6 kPa). Jeweils ein konventioneller und ein ökologischer Betrieb wirtschaften pfluglos. Somit kann dieses Kriterium bei der Gesamtbeurteilung vernachlässigt werden. Auf den 10 ökologisch bewirtschafteten Flächen standen vor dem Jahr der Probenahme in acht Fällen Leguminosen direkt und in zwei Fällen eine Sommerung mit vorrangegangener Leguminose in der Fruchtfolge. Unter den ökologischen und konventionellen Betrieben befanden sich in gleichem Maße viehhaltende und viehlose Betriebe.

Die Messwerte sind dieselben, die zur Betrachtung der Beziehung zwischen Laborwerten und Parametern der visuellen Gefügeansprache dienlich waren (s. Kapitel 5.1.2.2).

Neben den umfangreichen bodenphysikalischen Messungen auf 20 Flächen wurden im Rahmen des Projekts auf einigen anderen Pilotbetriebe-Testflächen Spatendiagnosen durchgeführt, um auf diesem Weg einen umfassenderen Eindruck über den Zustand der Bodenstruktur zu erhalten. Insgesamt wurde auf 40 ökologische und 39 konventionell bewirtschaftete Flächen bonitiert. Auch hier wurden die untere Ackerkrume (AK, 15-25 cm) und der krumennahe Unterboden (UB, 30-45 cm) betrachtet.

### 5.1.6.2 Statistik

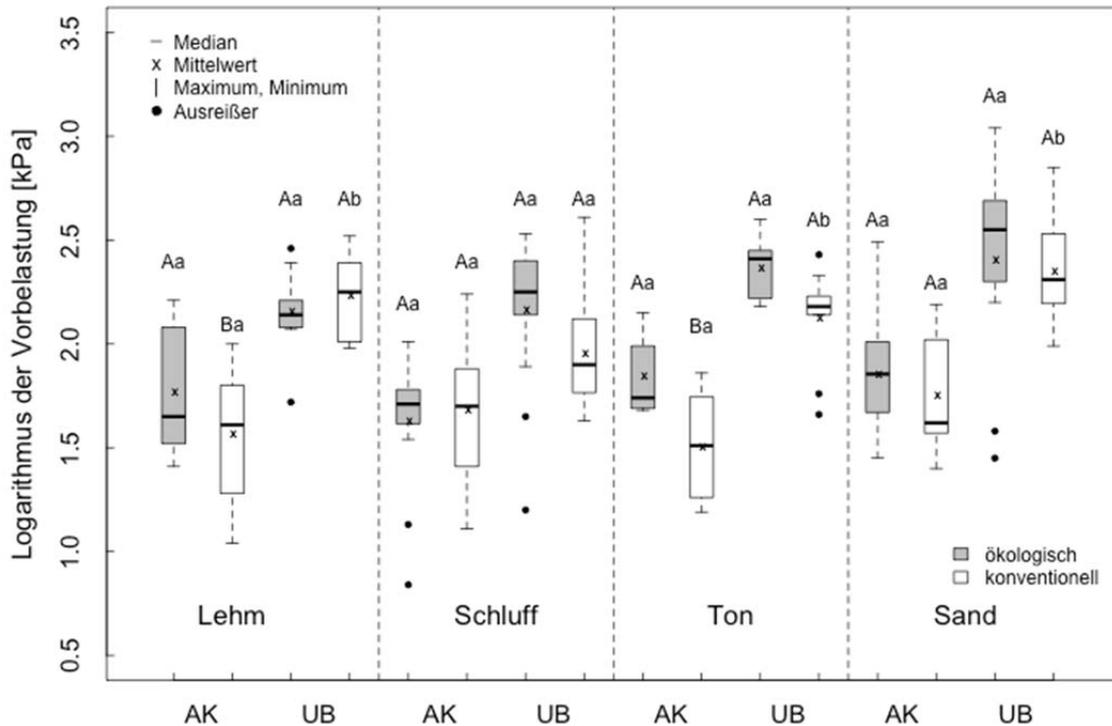
Die statische Auswertung erfolgte mittels eines multiplen t-Test in einem gemischten Modell, mit Berücksichtigung der zufälligen Effekte innerhalb einer Versuchsfläche (Grabloch) und Betriebsauswahl und der festen Effekte Probenahmetiefe, Bewirtschaftungssystem und Bodenartenhauptgruppen mit dem Programm SAS (SAS Institute Inc., 2008).

### 5.1.6.3 Ergebnisse

#### 5.1.6.3.1 Mechanische Vorbelastung

Abbildung 5.1-13 zeigt, dass die ökologischen Flächen der Lehm Böden ( $n = 3$ ) im Mittel eine mechanische Vorbelastung von  $\log 1,77$  (60 kPa) in der unteren Ackerkrume und  $\log 2,16$  (145 kPa) im krumennahen Unterboden besitzen. Auf den konventionellen Flächen ( $n = 2$ ) konnten im Mittel Messwerte in Höhe von  $\log 1,57$  (37 kPa) in der Ackerkrume und  $\log 2,24$  (172 kPa) im Unterboden ermittelt werden. Für die Schluffböden ergeben sich auf den ökologischen Flächen ( $n = 3$ ) Mittelwerte von  $\log 1,63$  (43 kPa) in der Ackerkrume und  $\log 2,17$  (147 kPa) im Unterboden. Für die konventionell bewirtschafteten Flächen ( $n = 3$ )  $\log 1,68$  (48 kPa) in der Ackerkrume und  $\log 1,96$  (91 kPa) im Unterboden. Die Tonböden weisen auf den ökologischen Flächen ( $n = 1$ ) Werte von  $\log 1,85$  (71 kPa) in der Ackerkrume und  $\log 2,37$  (236 kPa) im Unterboden und auf den konventionellen Flächen ( $n = 2$ ) Werte von  $\log 1,51$  (32 kPa) in der Ackerkrume und  $\log 2,13$  (134 kPa) im Unterboden auf. Die Sandböden zeigen texturbedingt im Unterboden hohe Vorbelastungswerte von  $\log 2,49$  (309 kPa, öko) und  $\log 2,35$  (223 kPa,

kon) auf. In der Ackerkrume liegen die Werte auf den ökologischen Flächen (n = 3) bei log 1,86 (72 kPa) und auf den konventionellen Flächen (n = 3) bei log 1,76 (58 kPa).



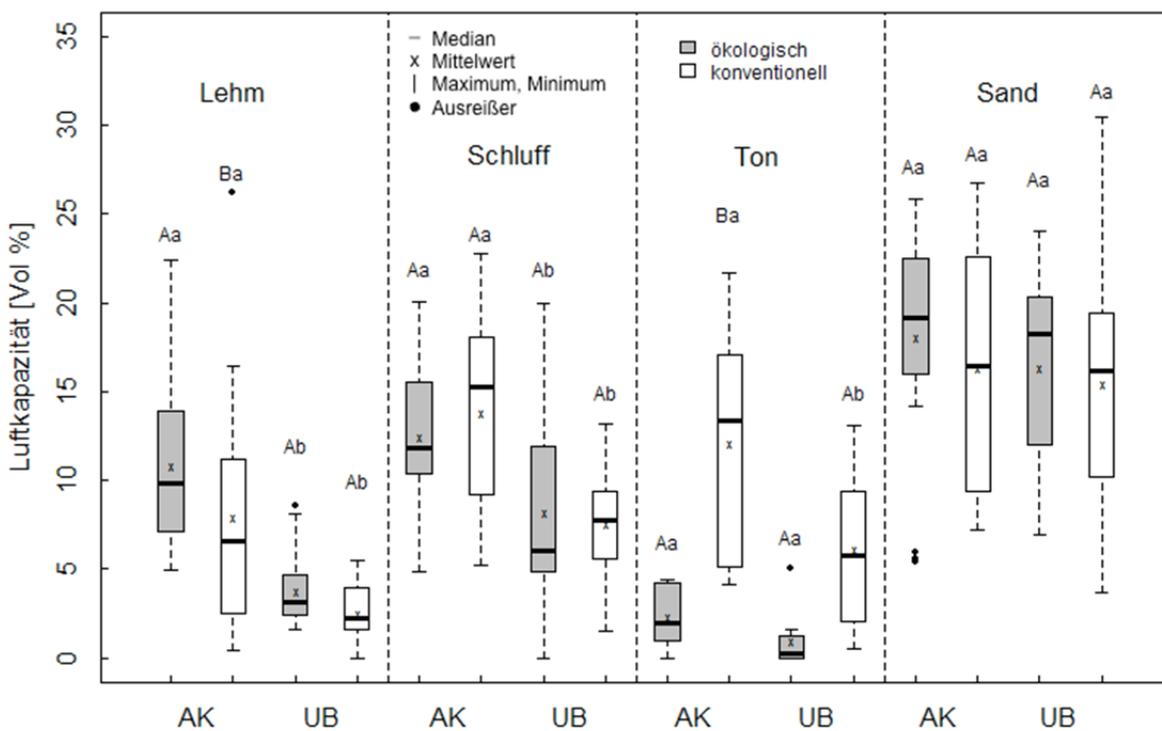
**Abbildung 5.1-13:** Ergebnisse der logarithmierten Werte der mechanischen Vorbelastung [kPa] der Ackerkrume (AK; 17 – 23 cm) und des krumennahen Unterbodens (UB; 32 - 38 cm). Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede bei  $\alpha = 0,05$ ; große Buchstaben = Unterschiede zwischen den Systemen innerhalb einer Tiefe; kleine Buchstaben = Unterschiede innerhalb eines Systems zwischen den zwei Tiefen.

Insgesamt sind auf den ökologischen Flächen im Mittel höhere Vorbelastungswerte bestimmt worden. In der Ackerkrume (AK; 17 - 23 cm) liegen die Werte der ökologisch bewirtschafteten Ton- und Lehm-böden signifikant über den der konventionellen. Jedoch weisen die Lehme eine hohe Varianz und die Tone einen sehr geringen Stichprobenumfang auf. Im Unterbodenbereich (UB; 32 – 38 cm) sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen vorhanden.

### 5.1.6.3.2 Luftkapazität

In Abbildung 5.1-14 sind die Ergebnisse der Laboranalysen der Luftkapazität innerhalb der Hauptbodenartengruppen, der Entnahmetiefe und des Bewirtschaftungssystems aufgezeigt.

Die Werte der Luftkapazität auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen der Lehmböden ( $n = 3$ ) befinden sich im Mittel bei 10,8 Vol% in der Ackerkrume und 3,7 Vol% im Unterboden. Auf den konventionellen Flächen dieser Standortgruppe ( $n = 2$ ) liegen die Werte im Mittel bei 7,9 Vol% in der Ackerkrume und 2,5 Vol% im Unterboden. Auf den Schluffböden sind sich die Werte der ökologischen und konventionellen Flächen sehr ähnlich. Hier finden sich Luftkapazitäten von 12,4 Vol% (öko:  $n = 3$ ) und 13,8 Vol% (kon:  $n = 3$ ) in der Ackerkrume und 8,2 Vol% (öko) bzw. 7,6 Vol% (kon) im Unterboden. Bei den Tonböden liegen die Werte der Luftkapazität bei der ökologischen Fläche ( $n = 1$ ) bei 2,3 Vol% im Oberboden und 0,9 Vol% im Unterboden. Die konventionellen Varianten ( $n = 2$ ) liegen bei 12,1 Vol% in der Ackerkrume und 6,1 Vol% im krumennahen Unterboden. Die Sandböden weisen bei Mittelwerte mit ähnlichem Niveau sehr hohe Schwankungen auf. Die Werte der Luftkapazität in der Ackerkrume liegen bei 18,1 Vol% (öko:  $n = 3$ ) und 16,3 Vol% (kon:  $n = 3$ ). Im Bereich des krumennahen Unterbodens liegen die Werte bei 16,4 Vol% (öko) und 15,4 Vol% (kon).



**Abbildung 5.1-14:** Ergebnisse der Luftkapazität [Vol%] in der Ackerkrume (AK; 17 – 23 cm) und des krumennahen Unterbodens (UB; 32 – 38 cm). Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede bei  $\alpha = 0,05$ ; große Buchstaben = Unterschiede zwischen den Systemen innerhalb einer Tiefe; kleine Buchstaben = Unterschiede innerhalb eines Systems zwischen den zwei Tiefen.

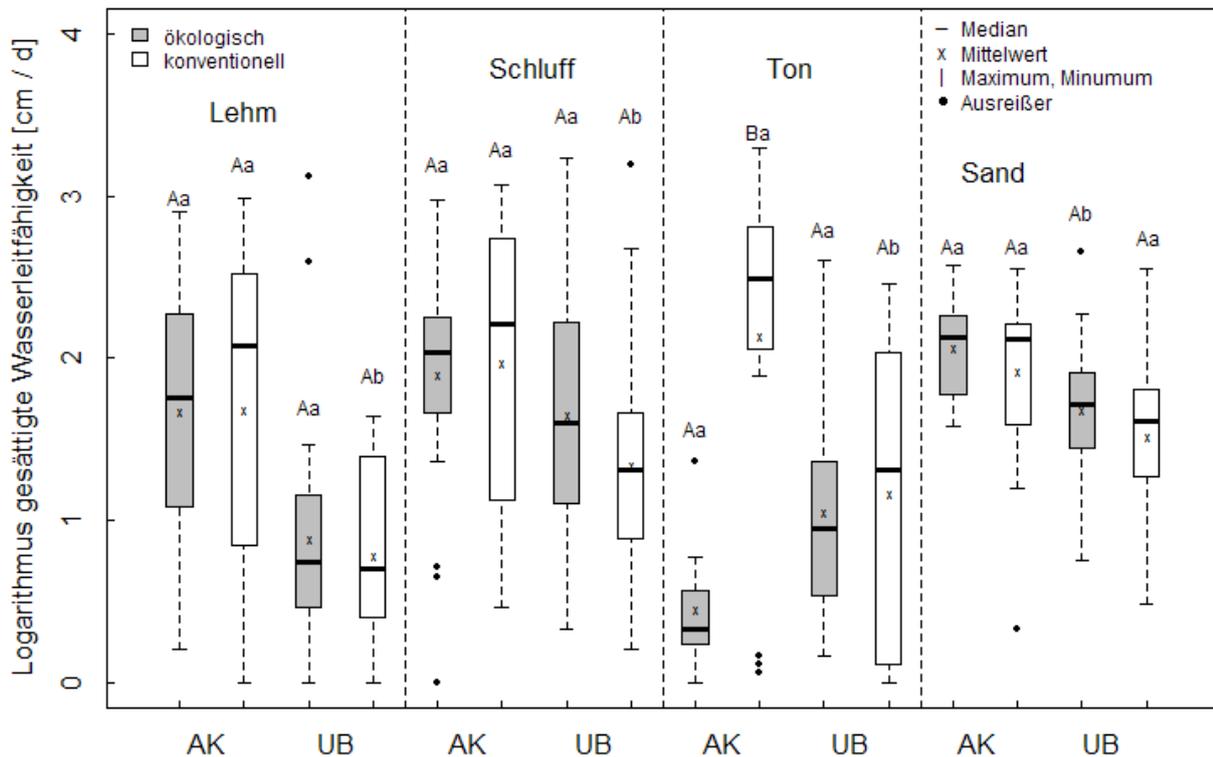
Auf den Lehm- und Tonböden sind signifikante Unterschiede zwischen den Systemen bei den Werten der Luftkapazität in der Ackerkrume (17 - 23 cm) zu finden. Wobei die Luftkapazitäten in den ökologisch

bewirtschafteten Ackerkrumen der Lehmböden und die der konventionell bewirtschafteten Ackerkrume der Tonböden signifikant höher lagen. Auch gibt es Unterschiede innerhalb der Systeme zwischen der Ackerkrume und dem krumennahen Unterboden auf den Lehm-, den Schluff- und auf der konventionellen Flächen der Tonböden. Die Sand-Standorte zeigen keinerlei Signifikanzen. Innerhalb keiner Bodenartenhauptgruppe zeigen sich Unterschiede im Bereich des krumennahen Unterbodens zwischen den Systemen.

#### 5.1.6.3.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen der Lehmböden ( $n = 3$ ) finden sich gesättigte Wasserleitfähigkeiten von  $\log 1,67$  ( $46 \text{ cm d}^{-1}$ ) in der Ackerkrume und  $\log 0,89$  ( $8 \text{ cm d}^{-1}$ ) im krumennahen Unterboden (Abbildung 5.1-15). Die konventionell bewirtschafteten Flächen dieser Standortgruppe ( $n = 3$ ) weisen im Mittel Werte von  $\log 1,68$  ( $48 \text{ cm d}^{-1}$ ) in der Ackerkrume und  $\log 0,78$  ( $6 \text{ cm d}^{-1}$ ) im Unterboden auf. Die Werte der Schluffböden bewegen sich im Mittel um  $\log 1,9$  ( $79 \text{ cm d}^{-1}$ , öko:  $n = 3$ ) und  $\log 1,97$  ( $94 \text{ cm d}^{-1}$ , kon:  $n = 3$ ) innerhalb der unteren Ackerkrume und bei  $\log 1,65$  ( $45 \text{ cm d}^{-1}$ , öko) und  $\log 1,34$  ( $22 \text{ cm d}^{-1}$ , kon) im Unterboden. Auf den Tonböden schwanken die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit im Mittel zwischen  $\log 0,45$  ( $3 \text{ cm d}^{-1}$ , öko:  $n = 1$ ) und  $\log 2,14$  ( $138 \text{ cm d}^{-1}$ , kon:  $n = 2$ ) innerhalb der Ackerkrume. Im Bereich des krumennahen Unterbodens liegen die Werte bei  $\log 1,06$  ( $11 \text{ cm d}^{-1}$ , öko) und  $\log 1,16$  ( $15 \text{ cm d}^{-1}$ , kon). Die Sandböden weisen insgesamt eher hohe Werte auf. So liegen die Leitfähigkeiten in der Ackerkrume bei  $\log 2,07$  ( $117 \text{ cm d}^{-1}$ , öko:  $n = 3$ ) und  $\log 1,92$  ( $84 \text{ cm d}^{-1}$ , kon:  $n = 3$ ). Im Unterboden finden sich Werte im Mittel von  $\log 1,69$  ( $48 \text{ cm d}^{-1}$ , öko) und  $\log 1,52$  ( $33 \text{ cm d}^{-1}$ , kon).

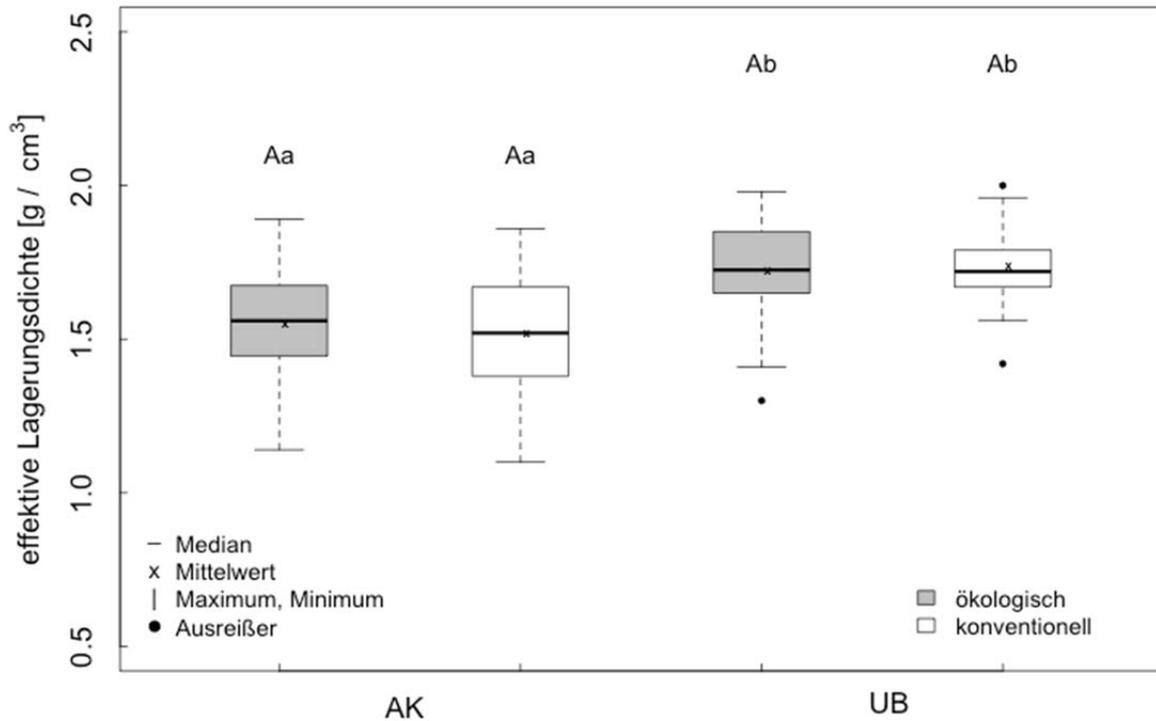
Hinsichtlich der gesättigten Wasserleitfähigkeit gibt es nur in der Ackerkrume der Tonböden einen signifikanten Unterschied zwischen den Systemen. Auf den konventionell bewirtschafteten Flächen liegen die Werte deutlich über den Wert der ökologisch bewirtschafteten Fläche. Innerhalb der Systeme und Bodenartenhauptgruppe gibt es Unterschiede zwischen den Werten der Ackerkrume und des krumennahen Unterbodens auf den konventionellen Schluff-, Lehm- und Tonböden und auf den ökologischen Sandböden. Zwischen den Systemen sind keine signifikanten Unterschiede in den Varianten des krumennahen Unterbodens.



**Abbildung 5.1-15:** Ergebnisse der Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit [cm / d] in der Ackerkrume (AK; 17 – 23 cm) und des krumennahen Unterbodens (UB; 32 – 38 cm). Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede bei  $\alpha = 0,05$ ; große Buchstaben = Unterschiede zwischen den Systemen innerhalb einer Tiefe; kleine Buchstaben = Unterschiede innerhalb eines Systems zwischen den zwei Tiefen.

#### 5.1.6.3.4 Effektive Lagerungsdichte

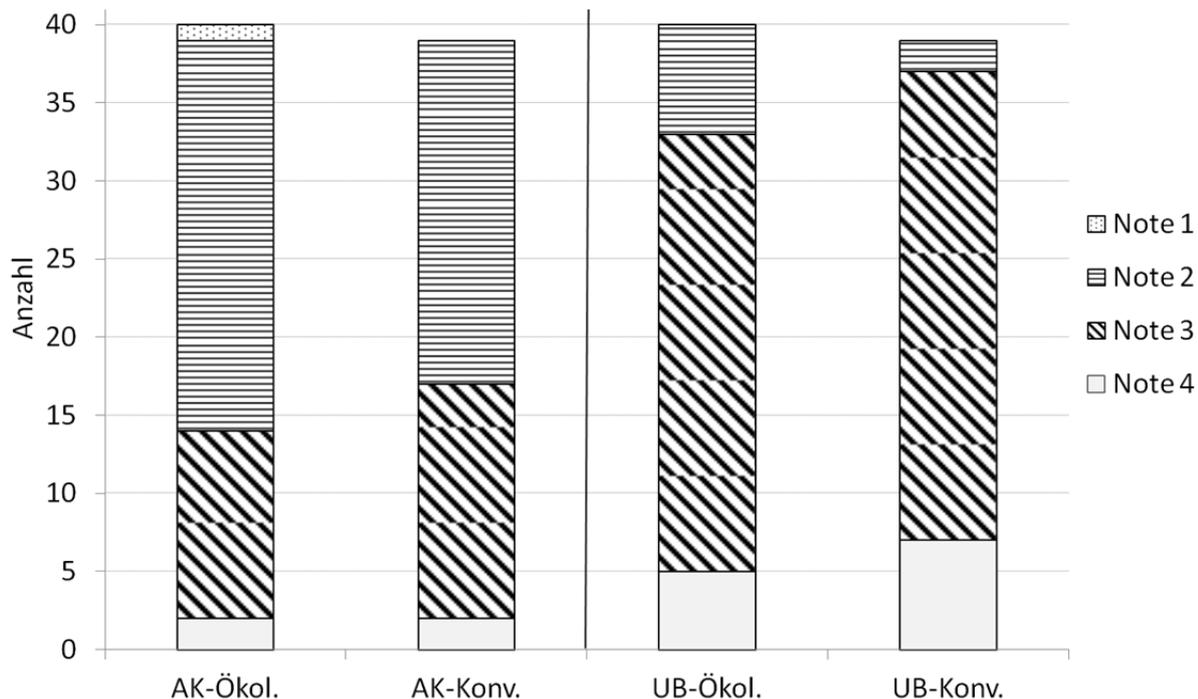
Die Darstellung der Ergebnisse in Form der effektiven Lagerungsdichte findet auch hier über alle Bodenarten betrachtet statt. Die Werte der effektiven Lagerungsdichte unterscheiden sich innerhalb der ökologischen Flächen zwischen der Ackerkrume ( $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $n = 20$ ) und dem krumennahen Unterboden ( $1,73 \text{ cm}^{-3}$ , kon) (Abbildung 5.1-16). Genauso verhält es sich auf den konventionellen Flächen mit  $1,51 \text{ cm}^{-3}$  in der Ackerkrume und  $1,74 \text{ cm}^{-3}$  im krumennahen Unterboden. Innerhalb einer Tiefe unterscheiden sich die Systeme nicht.



**Abbildung 5.1-16:** Ergebnisse der effektiven Lagerungsdichte [ $\text{g} / \text{cm}^3$ ] in der Ackerkrume (AK; 17 -23 cm) und des krumennahen Unterbodens (UB; 32 – 38 cm). Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede bei  $\alpha = 0,05$ ; große Buchstaben = Unterschiede zwischen den Systemen innerhalb einer Tiefe; kleine Buchstaben = Unterschiede innerhalb eines Systems zwischen den zwei Tiefen.

### 5.1.6.3.5 Feldbonitur

Neben den umfangreichen bodenphysikalischen Messungen auf 20 Flächen wurden im Rahmen des Projekts auch auf anderen Pilotbetriebe-Testflächen Spatendiagnosen mit den benannten Schemata nach Diez (1991) und der DIN 19682-10 (2007) durchgeführt (s. Kapitel 5.1.2.3), um dort einen Eindruck über den Zustand der Bodenstruktur zu erhalten. Insgesamt auf 40 ökologisch und 39 konventionell bewirtschaftete Flächen wurden Bonituren vorgenommen. Hier wurden - genau wie für die Labormessungen - die untere Ackerkrume (AK, 15 - 30 cm) und der krumennahe Unterboden (UB, 30 - 45 cm) betrachtet.



**Abbildung 5.1-17:** Darstellung der vergebenen Boniturnoten auf ökologisch und konventionell bewirtschafteten Flächen in der unteren Ackerkrume (AK, 15 - 30 cm) und dem krumennahen Unterboden (UB, 30 - 45 cm).

In Abbildung 5.1-17 sind die Ergebnisse der ergänzenden visuellen Gefügeansprache dargestellt. Die Boniturnote 1 (äußerst günstige Bedingungen) ist nur einmal innerhalb einer ökologisch bewirtschafteten Ackerkrume (15 - 30 cm) vergeben worden. Am häufigsten wurde die Ackerkrume mit Note 2 beurteilt. Insgesamt 25-mal auf ökologischen und 22-mal auf konventionellen Flächen. Mit der Note 3 wurden zwölf Mal die Ackerkrume von ökologischen Flächen und 15 Mal von konventionellen Flächen bewertet. Die Note 4 wurde jeweils zweimal in der Ackerkrume diagnostiziert.

Für den krumennahen Unterboden ist die Note 2 siebenmal auf ökologisch bewirtschafteten Flächen und zweimal auf konventionell bewirtschafteten Flächen vergeben worden. Mit Note 3 wurden 28 ökologische und 30 konventionelle Flächen im Bereich des krumennahen Unterbodens beurteilt. Fünf ökologische und sieben konventionell bewirtschaftete Flächen wurden im Bereich des krumennahen Unterbodens mit Note 4 bewertet.

#### 5.1.6.4 Diskussion

Der Zustand der Bodenstruktur wird aus ökologischer Sicht als gut befunden, wenn sie über einen erhöhten Widerstand gegenüber Verdichtungen und Erosion verfügt und den Ansprüchen der Pflanzenwurzeln hinsichtlich Luft-, Wasser- und Nährstoffversorgung genüge trägt. Ein Faktor des Erosionsschutzes ist das Vorhandensein wasserstabiler Aggregate. Diese entstehen durch biologische Verbau-

ung (Kuntze et al., 1994). In vielen Untersuchungen (z.B. Beste, 2003) wurde eine erhöhte Aggregatstabilität auf ökologisch bewirtschafteten Flächen nachgewiesen. Ergebnisse von Williams und Petticrew (2009) zeigen wiederum, dass in dieser Hinsicht die organische Düngung einen größeren Einfluss hat als das System selbst. Da in der vorliegenden Untersuchung keine Analysen zur Aggregatstabilität gemacht wurden und zum Zeitpunkt des Verfassens des Berichtes auch keine Werte für bodenbiologische Untersuchungen und Gehalte an organischem Kohlenstoff vorliegen, die Rückschlüsse zur biologischen Aktivität zulassen würden, kann darauf nicht weiter eingegangen werden. Ein ebenso wichtiger Aspekt ist das Vorhandensein eines kontinuierlichen Grobporensystems, das auch größere Wassermengen in kurzer Zeit infiltrieren lässt und gleichzeitig die Durchlüftung der Wurzelzone gewährleistet.

**Hypothese 1** - Im Ökologischen Landbau wird die Bodenstruktur durch systemtypische Maßnahmen, wie häufiges Befahren zur Unkrautregulierung, dem Ausbringen von organischem Dünger und dem vermehrten Anbau von Sommerungen und der damit verbundenen Bewirtschaftung im Frühjahr, stärker beansprucht als im Konventionellen Landbau.

Die wurzelökologischen Mindestansprüche an die Bodenstruktur liegen bei einer Luftkapazität von mindestens 8 Vol% in der Ackerkrume und 5 Vol% im Unterboden, einem Infiltrationsvermögen (gesättigte Wasserleitfähigkeit) von mindestens  $10 \text{ cm d}^{-1}$  und einer effektiven Lagerungsdichte von höchstens  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ . Deutlich ist zu erkennen, dass die Gefügeansprüche im Unterboden gleichermaßen von ökologischen als auch konventionellen Betrieben nicht immer erfüllt werden.

Die Höhe der mechanischen Vorbelastung entspricht einer bodeninternen Stabilität gegenüber dem Zusammendrücken (Lebert, 2010). Bei welchem Wert der mechanischen Vorbelastung die Pflanzenwurzeln den mechanischen Widerstand nicht mehr überwinden können und somit eine Schadverdichtung vorliegt, hängt unter anderem von der Textur des Bodens ab. Im Abschnitt 5.1.2.2 wurde geklärt, dass Werte um 130 kPa auf einen schadverdichteten Bereich hindeuten. Ebenfalls wurde erörtert, dass der Messwert der Vorbelastung allein nicht ausreicht, um eine Schadverdichtung zu identifizieren. In der Gesamtbetrachtung liegen die Werte der mechanischen Vorbelastung der ökologischen Betriebe tendenziell höher als die der konventionell wirtschaftenden. Im Mittel überschreiten die Werte der ökologischen Flächen die oben genannten Werte im Bereich des krumennahen Unterbodens. Außer auf den Schluffböden trifft dies ebenso für die konventionellen Flächen zu. Die Richtwerte der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit werden im Unterbodenbereich nur von den Flächen der Lehm Böden beider Systeme unterschritten. Die statistische Auswertung zeigte lediglich im Bereich der Ackerkrume Unterschiede zwischen den Systemen. Dieser Bereich ist jedoch durch Bodenbearbeitung und dem Grad der natürlichen Setzung des Bodens starken jahreszeitlichen Schwankungen unterlegen. Zusätzlich wurden auf den Flächen individuelle und systemunabhängige Bewirtschaftungen von den Praxisbetrieben durchgeführt. Weniger starken Schwankungen hinsichtlich bodenphysikalischer Eigenschaften unterliegt der unbearbeitete Unterboden. Diese Betrachtungstiefe ist deshalb für mittel- und langfristige Beobachtungen des Bodengefüges eher geeignet (Lebert, 2010). Die statistische Auswertung zeigte in der Tiefe des krumennahen Unterbodens bei keinem Messparameter signifikante Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungssystemen. Eine umfassende Literaturliteraturauswertung von Stolze et al. (2000) kam ebenfalls zu dem Schluss, dass hinsichtlich Bodenstruktur kein Unterschied zwischen Konventionellem und Ökologischen Landbau vorhanden ist. Ogist et al. (2006) beschreiben, dass die

gegebenen Standortbedingungen, also die unterschiedlichen Bodenarten, einen größeren Einfluss als die Bewirtschaftungsweise haben. Dies verdeutlichen auch die vorliegenden Ergebnisse. Innerhalb einer Bodenart verhalten sich die Werte der ökologischen und konventionellen Flächen recht ähnlich, zwischen den Bodenarten jedoch sehr unterschiedlich. Eine Ausnahme bilden die Werte der Tonböden. Aufgrund der Tatsache, dass lediglich eine ökologische Fläche und zwei konventionelle Flächen dieser Bodenartengruppe zugeordnet wurden, kann wegen des geringen Stichprobenumfangs keine Aussage getroffen werden. Neben den Laborwerten zeigen auch die Gefügebonturen keinen ersichtlichen Unterschied zwischen den Systemen. Günstige und ungünstige Gefügezustände wurden im gleichen Maß festgestellt.

Es kann geschlussfolgert werden, dass die ökologisch bewirtschafteten Flächen gleichermaßen wie die konventionellen Flächen einer Verdichtungsgefährdung unterliegen. Da eine Verminderung des zu erschließenden Wurzelraumes einhergeht mit einem verringerten Nährstoffangebot, das nicht kurzfristig durch schnellwirkende Mineraldünger ausgeglichen werden kann, ist eine optimale Bodenstruktur im ökologischen Landbau besonders erstrebenswert.

**Hypothese 2** - Durch den Anbau von tiefwurzelnden Leguminosen im ökologischen Landbau verbessern sich die Durchlüftung und die Infiltrationsrate in den Unterboden.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit in den Unterboden hängt maßgeblich von dem Vorhandensein von Bioporen, speziell von Wurzelgängen ab (Dexter et al., 2004). Wurzeln können jedoch nur in Poren gleicher oder größerer Größe einwachsen und keine neuen bilden (Helal, 1991). Wurzelhaare benötigen einen Porendurchmesser von mindestens 10 µm und Wurzeln von mindestens 50 µm zum Einwachsen. Eine Porenerweiterung geschieht dann in bereits erschlossenen Poren durch sekundäres Dickenwachstum mit Turgordrücken bis 1,5 MPa (Stahr et al., 2010).

Einen Unterschied zwischen den Systemen stellt der regelmäßige Anbau von Leguminosen im Ökolandbau dar. Die Wurzeln der zweikeimblättrigen Pflanzen und besonders der Leguminosen können höhere Widerstände überwinden bzw. höhere Turgordrücke aufbringen als die von Einkeimblättrigen, wie z.B. Getreide (Materchera et al., 1991). So könnten normal verdichtete Bereiche erschlossen werden und damit ökologisch voll funktionsfähig sein. Sollte jedoch das Grobporensystem durch eine Verdichtung zerstört worden sein, würden selbst die starken Wurzeln der Leguminosen diese nicht durchdringen können. Dies bestätigt wiederum, dass bei einer Gefügebeanspruchung im Feld dem Wuchs der Wurzeln besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Die Wurzelgänge in der unbearbeiteten Schicht sollten auch nach der Ernte der Pflanzen noch erhalten sein und von den nachfolgenden Pflanzen genutzt werden können. Hofmann (2000) findet in seinen Untersuchungen eine Förderung der Herausbildung von Bioaggregatgefüge und kontinuierlichen Porenübergängen zwischen Krume und Unterboden durch Anbau von Luzerne und Klee gras (Landsberger Gemenge). Dies würde sich in den nachfolgenden Kulturen in einer erhöhten gesättigten Wasserleitfähigkeit widerspiegeln. Diese Annahme wird durch vorliegende Messwerte nicht bestätigt. Eine Erklärung dafür kann sein, dass ökologisch wirtschaftende Betriebe in höherem Maße mechanische Bodenbearbeitungsmaßnahmen zur Unkrautregulierung anwenden und mehr Sommerungen, die bei höherer Bodenfeuchte im Frühjahr (Frühjahrsfurche zum Klee gras umbruch) bestellt werden, anbauen. Beide Maßnahmen können sich negativ auf das Grobporensystem auswirken. Auf pfluglos bearbeiten Praxisschlägen

konnte Götze (2012) feststellen, dass mit steigendem Anteil von Sommerungen in der Fruchtfolge sich der Zustand der Bodenstruktur der unteren Ackerkrume verschlechtert. Der Anbau von Leguminosen und Raps zeigte dagegen eine positive Wirkung. Unabhängig von der Fruchtfolge zeigen Ergebnisse von Beste (2003) eine erhöhte Aggregatstabilität auf pfluglos bewirtschafteten Flächen. Innerhalb der Variante „strukturschonende Bodenbearbeitung“ zeigen Untersuchungen im Systemversuch in Bad Lauchstädt eine Erhöhung der bodenphysikalischen Messwerten Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit zugunsten des ökologischen Landbaus unabhängig vom System viehhaltend oder viehlos (Buhl 2006). Obwohl sich dieser Bewirtschaftungsfaktor auf den Kohlenstoffgehalt des Bodens maßgeblich auswirkt (Oquist et al., 2006; Hathaway-Jenkins et al., 2011) und somit auch einen Einfluss auf die Bodenstruktur haben sollte.

Das Szenario eines pfluglos und ökologisch wirtschaftenden Betriebes ist jedoch eher selten und nur mit einem hohem Aufkommen an Bodenbearbeitungsmaßen zu bewältigen (Schmidt, 2010). Vornehmlich konventionelle Betriebe wirtschaften nach dem Prinzip der konservierenden Bodenbearbeitung, da sie dem erhöhten Unkrautaufkommen mit dem Einsatz von Herbiziden begegnen können. Im ökologischen Landbau ist dies nicht möglich und die wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug spielt nach wie vor die zentrale Rolle der Unkrautregulierungsmaßnahmen.

Neben dem Effekt der Wurzelpenetration bringt der Anbau von Klee gras zusätzliches organisches Material in den Boden, was wiederum die biologische Aktivität und damit die Bildung wasserstabiler Krümelaggregate fördert. Andererseits werden die Klee grasflächen mehrmals jährlich abgeerntet und zum Teil sogar von Rindern und Schafen beweidet. So unterliegen sie einer vermehrten mechanischen Beanspruchung.

Hypothese 2 kann nicht bestätigt werden und diese Untersuchung gibt Hinweise darauf, dass die strukturfördernden Maßnahmen der ökologischen Bewirtschaftungsweise – z.B. Anbau von Leguminosen, Förderung der organischen Bodensubstanz - durch andere systemtypische Verfahren – z.B. Unkrautregulierung mit dem Pflug, Anbau von Sommerungen (Frühjahrsfurche) - aufgehoben werden. Ein echter Effekt wird nur in einem exakten Feldversuch zu ermitteln sein.

#### **5.1.6.5 Schlussfolgerung**

Ein Unterschied des Zustandes der Bodenstruktur zwischen ökologisch und konventionell bewirtschafteten Flächen konnte nicht festgestellt werden. Die Messungen und eine zusätzliche Bonitur von 79 Flächen haben ergeben, dass sich die Ackerflächen im Allgemeinen in einem guten Zustand befinden. Die positiven Effekte der systemtypischen Maßnahmen des ökologischen Landbaus (Leguminosenanbau, Humusaufbau, leichte Maschinen) scheinen durch andere Verfahren, wie z.B. mechanische Unkrautregulierung, Bearbeitungsmaßnahmen im Frühjahr bei hoher Bodenfeuchte (Sommerungenanbau nach Frühjahrsfurche), aufgehoben. Es darf jedoch auch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden, dass auf konventionell bewirtschafteten Flächen ebenfalls Humusaufbau und damit Förderung der Bodenfauna und Erhöhung des  $C_{org}$ -Gehaltes betrieben wird.

### 5.1.7 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. Joachim Spilke von der Arbeitsgruppe Agrarinformatik und Biometrie und Frau Dipl. Inf. Yvonne Pöschel von der Arbeitsgruppe Bioinformatik der Martin Luther Universität Halle-Wittenberg für die kompetente und umfangreiche biometrische Beratung in vorliegender Arbeit.

### 5.1.8 Literatur

**AG Bodenkunde** (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung

**Aulakh MS, Doran JW, Mosier AR** (1992) Soil Denitrification-Significance, Measurement and Effects of Management” in: Advances in Soil Science, Hrsg.: BA Steward, Volume 18, Springer Verlag, 1-57

**Ball BC, Douglas JT** (2003) A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. Soil Use and Management, 19:50–56

**Benecke P** (1966) Die Geländeansprache des Bodengefüges in Verbindung mit der Entnahme von Stechzylinderproben für Durchlässigkeitsmessungen. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber., Jg. 7:91-104

**Beste A** (2003) Erweiterte Spatendiagnose. 1. Aufl. Berlin: Köster

**Beste A, Hampl U, Kussel N** (2001) Bodenschutz in der Landwirtschaft. Stiftung Ökologie & Landbau, 80 S

**Beylich A, Oberholzer H-R, Schrader S, Höper H, Wilke B-M** (2010) Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. Soil and Tillage Research 109 (2) (August): 133-143

**Blume H-P** (1992) Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und -belastung: vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Landsberg/Lech: ecomed

**Blume H-P, Schlichting E** (1966) Bodenkundliches Praktikum. Hamburg ,Parey

**Brunotte J, Senger M, Heyn J, Voßhenrich H-H, Epperlein J, Vorderbrügge T, Ortmeier B, Lorens M** (2011) Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. Braunschweig; Neuenhagen: vTI; GKB

**Buhl G** (2006) Auswirkungen integrierter und ökologischer Landbewirtschaftung auf physikalische Bodeneigenschaften, Ertragsstruktur und Kornqualität bei Winterweizen im Mitteldeutschen Trockengebiet. Halle: Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Naturwissenschaftliche Fakultät III, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Lehrstuhl Allgemeiner Pflanzenbau / ökologischer Landbau

**Casagrande A** (1936) The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. of ICSMFE. Cambridge, MA, 22-26 June 1936. vol. 3. Cambridge, MA, 93-108

**Dannowski M** (1983) Methode zur Ermittlung der Durchwurzelbarkeit unterschiedlich verdichteten Bodens. Tag.- Ber., Akad. Landwirtsch.- Wiss. DDR. 215:165-172

- Dannowski M** (1987) Die Auswirkungen wiederholter Belastung von Spurbahnen durch Fahrwerke auf Trockenrohdichte und Durchwurzelbarkeit eines stark lehmigen Sandbodens. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk. 31:573-581
- Dexter AR, Czyż EA, Gałę OP** (2004) Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. Soil and Tillage Research 79 (2) (Dezember):185–189
- Diez T** (1991) Beurteilung des Bodengefüges im Feld - Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 94-103
- DIN ISO 11272** (2001) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte
- DIN ISO 11274** (2001) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens
- DIN 18135** (2011) Baugrund- Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch
- DIN 19682-10** (2007) Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen – Teil 10 Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges
- DIN 19683-9** (1998) Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - physikalische Laboruntersuchungen - Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben
- Dumbeck G** (1986) Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden, Diss. Univ. Gießen, Giessener Bdkl. Abh., Bd. 3
- Edwards CA, Bohlen PJ** (1996) Biology and Ecology of Earthworms. 3. Aufl. Chapman & Hall
- Ehlers W, Werner D, Mähner T** (2000) Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss - Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. J. Plant Nutr. Soil Sci. 163:321-333
- Fleige H, Horn R, Stange F** (2002) Soil Mechanical Parameters Derived from the CA-database on Subsoil Compaction. In Jones R & Pagliai M: Sustainable land management - environmental protection: a soil physical approach. Reiskirchen: Catena-Verl., 359–366
- Fleige H, Horn R** (2000) Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. Advances in GeoEcologie 32:258-268
- Görbing J** (1948) Die Spatendiagnose. Hamburg: Verl. Sachse
- Götze P** (2012) Bodenstrukturzustand der unteren Ackerkrume auf langjährig konservierend und tiefenreduziert bearbeiteten mitteldeutschen Ackerflächen - Masterarbeit. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität
- Gullich P, Paul R, Marre G** (2010) Erhaltung und Nutzung eines leistungsfähigen Bodengefüges: gehalten auf der Thüringer Ackerbauforum, 15. September 2010 in Leinefelde, 2010.  
[http://www.tll.de/ainfo/pdf/abforum/abf10\\_03f.pdf](http://www.tll.de/ainfo/pdf/abforum/abf10_03f.pdf)

- Harrach T, Kuhn W, Zörb H** (1999) Klassifizierung von Gefügekennwerten zur Abgrenzung und Beurteilung von Schadverdichtungen nach wurzelökologischen Kriterien, *Mitt. Dtsch. Bdkdl Ges.*, 91:1217-1220
- Harrach T, Vorderbrügge T** (1991) Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Berichte über Landwirtschaft*. 2:69–82
- Hartge KH, Bachmann J** (2004) Ermittlung des Spannungszustandes von Böden aus Werten des Eindringwiderstandes von Sonden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167:303–308
- Hathaway-Jenkins LJ, Sakrabani R, Pearce B, Whitmore AP, Godwin RJ** (2011) A Comparison of Soil and Water Properties in Organic and Conventional Farming Systems in England. *Soil Use and Management* 27 (2) (Juni 1):133–142
- Helal M** (1991) Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 154:403–407
- Herbst F, Hofmann B** (2005) Ursachen und Auswirkungen von Wachstumsstörungen bei Sommerweizen in einem Feldbestand. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17:38-41
- Hofmann B** (2000) Erfassung und Bewertung bewirtschaftungsbedingter Bodenstrukturveränderungen. In *Hülsbergen & Diepenbrock: Die Entwicklung von Fauna, Flora und Boden nach Umstellung auf ökologischen Landbau - Untersuchungen auf einem mitteldeutschen Trockenlößstandort*. Halle: Deutsche Wildtierstiftung, Martin-Luther-Universität, 87–100
- Horn R, Fleige H** (2009) Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*, 102:201–208
- Horn R, Stork J, Dexter AR** (1987) Untersuchungen über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 150:342–347
- Joschko M, Gebbers R, Barkusky D, Rogasik J, Hoehn W, Hierold W, Fox CA, Timmer J** (2009) Location-dependency of earthworm response to reduced tillage on sandy soil. *Soil & Tillage Research*, 102:55–66
- Kayser E-A, Walenzik G, Heinemeyer O** (1995) Auswirkungen von Bodenverdichtung auf Bodenmikroorganismen. *KTBL Schrift* 362:157-175
- Keller T, Lamandé M, Schjonning P, Dexter, AR** (2011) Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163:13–23
- Kézdi Á** (1969) *Handbuch der Bodenmechanik*. Berlin: Verl. für Bauwesen
- Kuntze H, Roeschmann H, Schwerdtfeger G** (1994) *Bodenkunde*. Stuttgart: E. Ulmer
- Larink O, Heisler C, Söchtig W, Lübben B, Wickenbrock L** (1995) Einfluss verdichteter Ackerböden auf die Bodenfauna und ihr Beitrag zur Bodenlockerung. *KTBL Schrift* 362:142-156

- Lebert M** (2010) Entwicklung eines Prüfkzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. UBA-Texte
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C** (2004) Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden, Regelungen zur Gefahrenabwehr. Bd. 20071245. Berlin: Umweltbundesamt
- Lebert M** (1989) Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 12
- Materechera SA, Dexter AR, Alston AM** (1991) Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil* 135 (1) (August):31–41
- Müller L, Kay BD, Hu C, Li Y, Schindler U, Behrendt A, Shepherd TG, Ball BC** (2009) Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany: Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil & Tillage Research*, 103:178–187
- Nissen B** (1998) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland – bodenphysikalischer Ansatz. Diss. Univ. Kiel
- Oquist KA, Strook JS, Mulla DJ** (2006) Influence of Alternative and Conventional Management Practices on Soil Physical and Hydraulic Properties. *Vadose Zone Journal* 5 (1):356
- Passioura JB** (1991) Soil structure and plant growth“. *Soil Res.* 29 (6) (Januar 1):717-728
- Paul R** (2004) Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden. Zwischenbericht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena
- R Development Core Team** (2011) R: A and environment for statistical computing language. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <http://www.R-project.org>
- Rücknagel J, Brandhuber R, Hofmann B, Lebert M, Marschall K, Paul R, Stock O, Christen O** (2010) Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil and Tillage Research*, 106:165–170
- Rücknagel J, Harrach T, Dumbeck G, Gerschlaue F, Christen O** (2009) Morphological Characterization of Soil Structure and the Relation to Precompression Stress for Recultivated Loess Soil. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19.2009 Izmir-Turkey
- Rücknagel J, Hofmann B, Paul R, Christen O, Hülsbergen K-J** (2007) Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research*, 92:213–220
- Sas Institute Inc.** (2008) SAS 9.2. NY, USA: Cary, März 11
- Schmidt H** (2010) Öko-Ackerbau ohne tiefes Pflügen: Praxisbeispiele & Forschungsergebnisse, Köster, Berlin

- Spiess E, Diserens E** (2001) Zuckerrüben: Erntetechnik und Bodenschutz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Bericht Nr. 567:18
- Stahr K, Kandeler E, Hermann L, Streck T** (2010) Bodenkunde und Standortlehre. UTB GmbH, Stuttgart, 318 S
- Stepniewski W, Glinski J, Ball BC** (1994) Effects of Compaction on Soil Aeration Properties. In B.D.Soane, C.v. Ouwerkerk: Soil Compaction in Crop Production, 11:167-189. Developments in Agricultural Engineering. Netherland: Elsevier Science
- Stolze M, Piorr A, Häring A, Dabbert S** (2000) Environmental impacts of organic farming in Europe. Universität Hohenheim Inst. f. Landwirtschaftl. Betriebslehre
- Tenholtern R** (2000) Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürftigkeit und den Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlerevier. Diss. Univ. Gießen, Boden und Landschaft, Bd. 28
- Topp GC, Reynolds WD, Cook FJ, Kirby JM, Carter MR** (1997) Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G. and Carter, M.R. (Hrsg.): Soil quality for crop production and ecosystem health. Amsterdam: Elsevier. 21-58
- Voorhees WB** (2000) Long - term effect of subsoil compaction on yield of maize. *Advances in Geo Ecology* 32:44-54
- Vorderbrügge T, Brunotte J** (2011) Teil II: Bewertung eines Vorschlages zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen. In *Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research* 61-1, 1:23-40.61-1
- Vorderbrügge T** (1989) Einfluss des Bodengefüges auf Durchwurzelung und Ertrag bei Getreide: Untersuchungen an rekultivierten Böden und einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch, Diss.Univ. Gießen, Giessener Bdkdl. Abh., Bd. 5
- Werner D, Thämert W** (1989) Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustandes auf Produktionsflächen. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.* 33:729-739
- Weyer T, Boeddinghaus R** (2009) Bodenverdichtungen vermeiden – Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen, Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein Westfalen – Referat Öffentlichkeitsarbeit
- Williams ND, Petticrew EL** (2009) „Aggregate Stability in Organically and Conventionally Farmed Soils“. *Soil Use and Management* 25 (3) (September 1):284–292

### 5.1.9 Anhang

**Tabelle A5.1-1:** Übersicht: Bezeichnung, Probenahmetiefe, Textureigenschaften, Mittelwerte: der Trockendichte (TRD), der Aggregatdichte (ARD), der Luftkapazität (LK), der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert), der Logarithmus der mechanischen Vorbelastung ( $\log \sigma_P$ ), die Boniturnoten nach Diez- und Packungsdichte (PD) -Schema und die Boniturnoten der Einzelparameter der untersuchten Flächen

Standort Nummer	Bezeich- nung	Tiefe [cm]	Textur			TRD	ARD	LK	log kf- Wert	log $\sigma_P$	Diez	PD	Wurzelvei- teilung	Makroporen	mechanischer Wie- derstand	Aggregatgröße	Lagerung der Aggre- gate	Gefügerom	Verfestigungsgrad
			Ton	Schluff	Sand														
11	1-1	17-23	90	660	250	1,40	1,59	12,8	2,0	1,71	2	2	1	1	3	3	3	2	
11	1-3	32-38	120	780	100	1,40	1,67	13,7	2,0	1,73	2	2	1	2	3	3	3	1	
12	2-1	17-23	170	670	160	1,21	1,62	11,5	2,3	1,75	2	2	2	2	2	2	2	2	
12	2-3	32-38	210	580	210	1,53	1,77	4,9	1,8	2,34	3	3	3	2	3	3	4	3	
14	1-1	17-23	180	350	470	1,44	1,63	14,3	1,8	1,94	2	2	2	3	3	2	3	2	
14	1-3	32-38	170	290	540	1,70	1,68	5,0	0,8	2,09	3	3	3	3	4	4	4	3	
21	2-1	17-23	390	520	90	0,94	1,31	16,3	2,8	1,52	1	2	1	1	2	2	2	2	
21	2-3	32-38	350	620	30	1,30	1,65	9,9	2,0	2,04	2	3	3	1	3	3	3	3	
22	2-1	17-23	110	610	280	1,12	1,44	16,8	2,1	1,69	2	2	1	2	2	2	2	2	
22	2-3	32-38	210	500	290	1,50	1,76	8,3	1,6	2,19	3	3	3	3	3	3	3	3	
24	2-1	17-23	190	570	240	1,23	1,63	16,9	2,8	1,33	1	1	1	1	2	-	-	2	
24	2-3	32-38	200	560	240	1,55	1,81	5,3	1,3	1,91	3	3	3	3	3	-	-	3	
52	2-1	17-23	60	80	860	1,53	-	15,6	2,3	2,03	2	2	1	3	2	-	-	2	
52	2-3	32-38	30	80	890	1,69	-	15,6	1,9	2,4	3	2	2	3	4	-	-	3	
53	2-1	17-23	60	110	830	1,38	1,68	21,1	1,9	1,77	2	2	1	2	2	-	-	2	
53	2-3	32-38	60	100	840	1,45	1,60	20,0	1,9	2,39	3	3	3	3	4	-	-	3	
54	2-1	17-23	230	600	170	1,38	1,71	12,9	1,3	1,43	3	3	3	4	3	3	3	3	
54	2-3	32-38	230	660	110	1,52	1,61	5,9	1,1	2,35	4	4	3	4	4	4	4	3	
56	2-1	17-23	60	80	860	1,53	-	17,0	1,9	1,80	3	2	1	2	2	-	-	2	
56	2-3	32-38	70	90	840	1,78	-	12,6	1,1	2,43	3	3	3	3	3	-	-	4	
62	2-1	17-23	20	140	840	1,53	-	23,9	2,2	1,77	3	2	1	4	3	-	-	3	
62	2-3	32-38	20	50	930	1,73	-	21,5	1,9	2,15	3	3	3	3	3	-	-	3	
63	2-1	17-23	40	200	760	1,40	-	9,5	2,2	1,51	2	2	1	3	3	-	-	2	
63	2-3	32-38	40	140	820	1,77	-	8,1	1,3	2,41	3	3	3	3	4	-	-	3	
64	1-1	17-23	210	660	130	1,47	1,62	7,8	1,0	1,96	3	3	2	3	2	3	4	3	
64	1-3	32-38	220	670	110	1,45	1,63	9,1	1,1	1,77	3	3	2	4	2	3	4	3	
66	2-1	17-23	80	120	800	1,62	-	15,4	1,2	1,95	3	3	2	3	3	-	-	3	
66	2-3	32-38	70	100	830	1,67	-	17,1	1,3	2,49	4	4	4	3	3	-	-	4	
70	1-1	17-23	310	540	150	1,53	1,58	2,3	0,5	1,85	3	3	2	3	4	3	3	3	
70	1-3	32-38	320	540	140	1,59	1,58	1,0	1,1	2,37	3	3	3	3	4	4	3	3	
71	2-1	17-23	290	310	400	1,47	1,69	8,0	1,4	1,51	2	2	2	1	2	3	3	3	
71	2-3	32-38	260	350	390	1,67	1,87	3,2	1,3	2,12	2	3	3	2	4	4	4	3	
77	1-1	17-23	250	470	280	1,15	1,40	10,2	1,8	1,94	2	2	2	2	3	2	2	3	
77	1-3	32-38	250	440	310	1,41	1,52	3,2	0,6	2,29	2	3	2	2	3	3	3	3	
80	1-1	17-23	300	670	30	1,38	1,61	7,9	1,5	1,50	3	3	3	3	3	3	3	2	
80	1-3	32-38	290	520	190	1,53	1,58	2,3	0,3	2,23	3	3	3	2	3	3	3	3	
81	2-1	17-23	210	360	430	1,52	1,76	9,8	1,8	1,41	3	4	4	3	4	4	4	3	
81	2-3	32-38	220	350	430	1,71	1,80	2,4	0,7	2,19	4	4	4	3	4	4	4	4	
87	3-1	17-23	270	350	380	1,39	1,58	6,0	1,5	1,72	2	3	2	2	3	3	3	3	
87	3-3	32-38	230	330	440	1,49	1,57	2,6	0,8	2,27	3	2	3	3	3	4	4	3	

