

Tagungsbeitrag zu: Postervorstellung
der Kommission I

Titel der Tagung: Böden - eine endliche
Ressource

Jahrestagung der DBG,
05. -13.09.2009 in Bonn

Berichte der DBG (nicht begutachtete
online Publikation)

Gefügemorphologie (Packungsdichte) und mechanische Bodeneigenschaften rekultivierter Böden aus Löß

J. Rücknagel¹, T. Harrach², G. Dumbek³,
F. Gerschlaier⁴, O.Christen¹

Zusammenfassung

Rekultivierte Böden aus Löss weisen in Abhängigkeit vom Rekultivierungsverfahren und der Folgebewirtschaftung sehr unterschiedliche Gefügestände und damit eine sehr differenzierte Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Belastungen auf. Die visuelle Gefügediagnose ist auf diesen Flächen ein einfaches Hilfsmittel zur Beurteilung des Bodengefüges und kann aufwändige Bodenanalysen ersparen. Eine Feldmethode der Gefügeansprache ist die Bestimmung der Packungsdichte. Mit ihr wird der Grad der Kompaktheit bzw. Lockerheit eines Bodenhorizontes in 5 Stufen definiert. Die mechanische Vorbelastung wird ebenfalls wesentlich von der Ausprägung des Interaggregatporensystems und damit der Dichteheterogenität innerhalb des Bodengefüges bestimmt.

1 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
Professur Allgemeiner Pflanzenbau/ÖL
Betty-Heimann-Str. 5
06120 Halle/Saale
jan.ruecknagel@landw.uni-halle.de

2 Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung
Justus-Liebig-Universität Gießen
Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen

3 RWE Power AG
Rekultivierung Land- und Forstwirtschaft
Friedrich-Ebert-Str. 104
50374 Erftstadt

4 Breslauer Str. 104
35321 Laubach

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, Beziehungen zwischen Indikatoren der visuellen Gefügebewertung und der mechanischen Vorbelastung zu quantifizieren. Zudem wird untersucht, ob die Vorbelastung nach einem Regressionsmodell aus der Trockenrohddichte und dem Aggregatdichte/Trockenrohddichte-Verhältnis hinreichend genau berechnet werden kann. Auf nordrhein-westfälischen Ackerflächen wurden dazu aus Unterbodenschichten Stechzylinderproben zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung bei einer Wasserspannung von -6 kPa (pF 1,8) entnommen und mit den Resultaten der visuellen Gefügeansprache verglichen. Im Ergebnis der Untersuchungen lassen sich den Stufen der Packungsdichte Spannbreiten der mechanischen Vorbelastung zuordnen. Dieser Zusammenhang begründet sich vor allem aus der Lagerungsart der Aggregate.

Schlüsselworte: mechanische Vorbelastung, Packungsdichte, Gefügebewertung

Einleitung

Grundanliegen dieser Arbeit ist es, Zusammenhänge zwischen der Gefügemorphologie und bodenmechanischen Eigenschaften zu quantifizieren. Im Einzelnen werden nachstehende Ziele verfolgt:

1. Ermittlung von Beziehungen zwischen Indikatoren der visuellen Gefügebewertung (Packungsdichte) und der mechanischen Vorbelastung sowie des Aggregatdichte/Trockenrohddichte-Verhältnisses (ARD/TRD).
2. Validierung des Regressionsmodells von Rücknagel et al. (2007) zur Berechnung der mechanischen Vorbelastung aus Aggregatdichte und Trockenrohddichte.

Material und Methoden Druck-Setzungsversuche

Die Untersuchungen fanden auf fünf nordrhein-westfälischen Ackerflächen statt, die nach unterschiedlichen Verfahren von der RWE Power AG rekultiviert wurden. Die Textureigenschaften der Ackerflächen weisen eine geringe Streu-

ung auf. Sie sind alle der Bodenartenhauptgruppe „Schluffe“ zuzuordnen (Tab. 1).

Tab. 1: Textureigenschaften der untersuchten Rekultivierungsflächen

Nr.	Standort & Tiefe (cm)	Ton (M.%)	Sand (M.%)
1.1.	Neurath I 33-36	-	-
1.2.	Neurath I 53-56	-	-
1.3.	Neurath I 78-81	-	-
2.1.	Neurath II 33-36	15,6	3,2
2.2.	Neurath II 53-56	15,6	3,2
2.3.	Neurath II 78-81	15,6	3,2
3.1.	Fortuna II 15-18	15,8	2,4
3.2.	Fortuna II 33-36	15,8	2,4
3.3.	Fortuna II 78-81	15,8	2,4
4.1.	Fischbach I 28-31	19,5	18,2
4.2.	Fischbach I 53-56	16,0	18,2
4.3.	Fischbach I 78-81	16,0	18,2
5.1.	Frechen 33-36	14,8	3,2
5.2.	Frechen 53-56	14,8	3,2
5.3.	Frechen 78-81	14,8	3,2

Aus jeweils drei Bodenschichten wurden Stechzylinderproben (220 cm³, h = 28 mm, d = 100 mm, n = 5) zur Durchführung von eindimensionalen Kompressionsversuchen (Druckstufen 5-550 kPa) entnommen. Die Versuche wurden bei einer Wasserspannung von -6 kPa (pF 1,8) durchgeführt. Die Bestimmung der mechanischen Vorbelastung erfolgte anhand der Druck-Trockenrohdichte-Funktionen nach dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936) durch zwei unabhängige Versuchspersonen. Am Beispiel des Standortes „Neurath II 33-36 cm“ wurde das auflastabhängige Verhalten des Gesamtbodens und der Aggregate separat analysiert. Dazu wurde auf die einzelne Stechzylinderprobe nur jeweils eine Druckstufe aufgebracht. Es wurden insgesamt 5 Druckstufen (5, 16, 50, 160, 500 kPa) mit je 3 Wiederholungen durchgeführt.

Bestimmung von Aggregatdichte und ARD/TRD-Verhältnis

An gestört entnommenem Bodenmaterial analog der Tiefen für die Stechzylinder der Ödometerversuche wurde die Dichte der Aggregate (Wasserspannung -6 kPa; Fraktion 8-10 mm) ermittelt. Die aus Tro-

ckenrohdichte (TRD) und ARD/TRD-Verhältnis (ARD/TRD; Quotient aus Aggregatdichte und Trockenrohdichte) nach der Gleichung

$$\log \sigma_P = -3,15 \cdot \text{ARD/TRD} + 0,60 \cdot \text{TRD} + 4,49$$

errechneten Vorbelastungen ($\log \sigma_P$) wurden den Messwerten gegenüber gestellt.

Bestimmung der Packungsdichte (Pd)

Mit Packungsdichte wird eine integrierende Bodeneigenschaft bezeichnet, die Gefügeeigenschaften in Abhängigkeit vom Grad der Kompaktheit bzw. Lockerheit zusammenfasst und im Feld sensorisch ermittelt wird (DIN 19682-10, 2007). Bei der Ermittlung der Packungsdichte werden vor allem folgende makroskopische Gefügemerkmale in fünf Stufen erfasst:

1. Der mechanische Bodenwiderstand beim Graben bzw. Einstechen mit einem Taschenmesser.
2. Die Größe der Aggregate.
3. Der Zusammenhalt des Bodengefüges wird mittels Fallprobe bestimmt.
4. Die Lagerungsart der Aggregate kennzeichnet die Beschaffenheit der Aggregatzwischenräume.
5. Der Anteil biogener Makroporen (Wurzelkanäle und Regenwurmröhren).
6. Die Wurzelverteilung in den einzelnen Bodenhorizonten.

Die Packungsdichte lässt sich wie folgt einstufen. Bei Pd 1 und Pd 2 ist der Boden locker, die Wasser- und Luftdurchlässigkeit sind hoch bzw. sehr hoch und die Durchwurzelbarkeit ist sehr gut. Bei Pd 3 ist der Boden nicht ausgesprochen locker und nicht ausgesprochen dicht. Die ökologischen Funktionen sind nicht oder kaum beeinträchtigt. Bei Pd 4 und Pd 5 ist der Boden verdichtet (schadverdichtet). Die ökologischen Bodenfunktionen werden stark bzw. sehr stark beeinträchtigt. In vorliegender Untersuchung wird die Packungsdichte in Schrittweiten von 0,5 Stufen angegeben, um die Streubreite der zugehörigen bodenphysikalischen Werte zu verringern.

Ergebnisse und Diskussion Gefügemorphologie und mechanische Bodeneigenschaften

Eine Übersicht der Trockenrohdichten, Aggregatdichten, ARD/TRD-Verhältnisse und Vorbelastungen enthält die Tabelle 2.

Tab. 2: Trockenrohdichte (TRD), Aggregatdichte (ARD), ARD/TRD-Verhältnis und Logarithmus der Vorbelastung ($\log \sigma_P$) bei -6 kPa Wasserspannung

Nr.	TRD (g/cm ³)	ARD (g/cm ³)	ARD/ TRD	$\log \sigma_P$
1.1.	1,61	1,79	1,11	1,89
1.2.	1,81	1,87	1,03	-
1.3.	1,71	1,69	0,99	2,47
2.1.	1,51	1,73	1,15	1,85
2.2.	1,54	1,68	1,09	2,27
2.3.	1,49	1,73	1,16	1,74
3.1.	1,56	1,70	1,09	2,21
3.2.	1,49	1,74	1,17	1,61
3.3.	1,40	1,78	1,27	1,16
4.1.	1,63	1,79	1,10	2,30
4.2.	1,76	1,83	1,04	-
4.3.	1,69	1,79	1,06	-
5.1.	1,57	1,77	1,13	2,06
5.2.	1,51	1,68	1,11	1,63
5.3.	1,54	1,70	1,10	1,76

Für die untersuchten Böden lässt sich das ARD/TRD-Verhältnis anhand der Stufen der Packungsdichte gut abschätzen (Abb. 1).

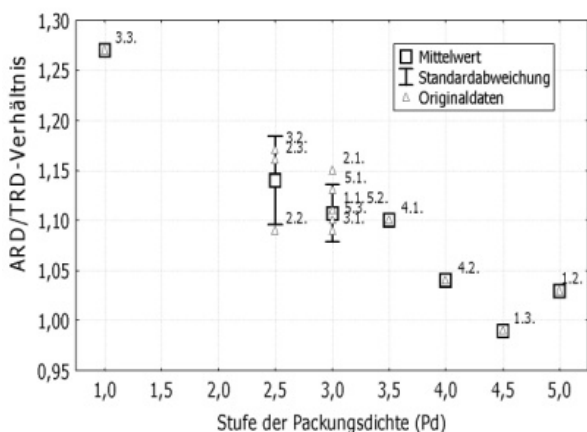


Abb. 1: Beziehung zwischen der Packungsdichte (Pd) und dem ARD/TRD-Verhältnis

Die Standardabweichung beträgt in diesem Fall jeweils etwa $\pm 0,03$. Näherungsweise entsprechen sehr hohe ARD/TRD-Verhältnisse der Packungsdichte 1,0-1,5,

mittlere ARD/ TRD-Verhältnissen der Packungsdichte 2,5-3,0 und geringe bis sehr geringe ARD/TRD-Verhältnissen der Packungsdichte $\geq 3,0$.

Den Stufen der Packungsdichte lassen sich analog dem ARD/TRD-Verhältnis auch Spannbreiten der mechanischen Vorbelastung zuordnen (Abb. 2). Die Standardabweichungen betragen im logarithmischen Maßstab etwa $\pm 0,20$. In der Einheit kPa nehmen diese aufgrund der Entlogarithmierung mit steigender Vorbelastung zu.

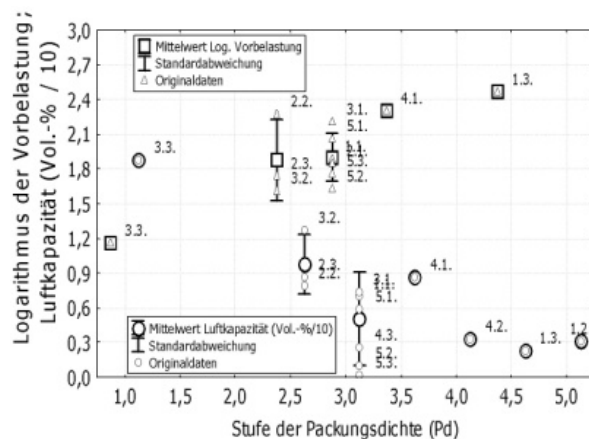


Abb. 2: Beziehung zwischen der Packungsdichte (Pd), der Vorbelastung (Logarithmus) und der Luftkapazität (Vol.-%/10)

Für die Gesamtbewertung und Optimierung des Bodenzustandes ist die mechanische Vorbelastung allein nicht ausreichend. Deshalb werden den Stufen der Packungsdichte die äquivalenten Luftkapazitäten zugeordnet. Sie nehmen mit steigender Packungsdichte ab und unterschreiten etwa bei der Stufe 3 die von Lebert et al. (2004) genannten Mindestanforderungen von 5 bis 8 Vol.-%. Bemerkenswert ist dabei der nahezu lineare Verlauf bei geringen Packungsdichten, der bei Packungsdichten ≥ 3 in einen stark degressiven Bereich übergeht. Eine Optimierung des Bodengefügezustandes ist aus Sicht der mechanischen Belastbarkeit und der bodenökologischen Anforderungen danach etwa bei einer Packungsdichte von 2,5 gegeben. Die Belastbarkeit des Bodengefüges beträgt bei dieser Stufe und Feldkapazität durchschnittlich 70-80 kPa (\log 1,85-1,90).

Auflastabhängiges Verhalten von Gesamtboden und Aggregaten

Zur Analyse des Verdichtungsprozesses ist es zweckmäßig das Verhalten von Gesamtboden (Trockenrohichte) und Aggregaten (Aggregatdichte) separat zu betrachten. Beispielhaft ist dies für den Standort „Neurath II 33-36“ dargestellt (Abb. 3). Die Veränderung von Trockenrohichte und Aggregatdichte verläuft nicht synchron. Im Wiederverdichtungsbereich des Gesamtbodens nimmt die Trockenrohichte geringfügig zu, während im Wiederverdichtungsbereich der Aggregate keine Änderung der Dichte zu beobachten ist. Die Vorbelastung der Aggregate ist mit 263 kPa sehr viel höher als die des Gesamtbodens (107 kPa). Mit Überschreitung der mechanischen Vorbelastung des Gesamtbodens (Übergang zum Erstverdichtungsbereich), ist lastabhängig ein deutlicher Anstieg der Trockenrohichte verbunden. Eine Zunahme der Aggregatdichte erfolgt erst bei der höchsten Laststufe. Die Dichte der Aggregate und des Gesamtbodens nähern sich bei dieser Auflast an. Während des gesamten Verdichtungsvorgangs reduziert sich das ARD/TRD-Verhältnis bis hin zu einem weitgehend geschlossenen Aggregatverband.

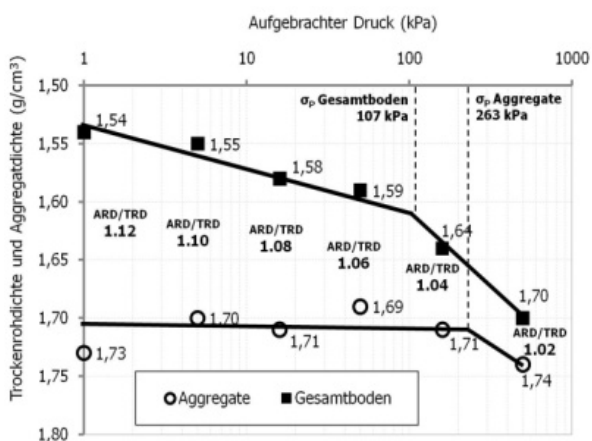


Abb. 3: Veränderung von Trockenrohichte (Gesamtboden) und Aggregatdichte mit steigendem Druck am Beispiel des Standortes „Neurath II 33-36“

Validierung des Regressionsmodells

Eine Gegenüberstellung der gemessenen und kalkulierten Vorbelastungswerte ist in Abb. 4 enthalten. Die Regressionsfunktion der Rekultivierungsflächen verläuft

deutlich flacher ($m=0,60$, $x_0=0,74$). Im Mittel sind die 12 Messwerte im logarithmischen Maßstab jedoch nur um 0,03 höher als die aus Aggregatdichte und Trockenrohichte berechneten Werte. Die mittlere absolute Abweichung (MAE) von gemessenen und berechneten Werten liegt bei 0,16. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung beträgt 0,78. Damit befinden sich die Werte alle im 95 % Prognoseintervall des Datensatzes von Rücknagel et al. (2007). Die mittlere absolute Abweichung und das Bestimmtheitsmaß sind bei vergleichbarem Wertebereich aber etwas ungünstiger.

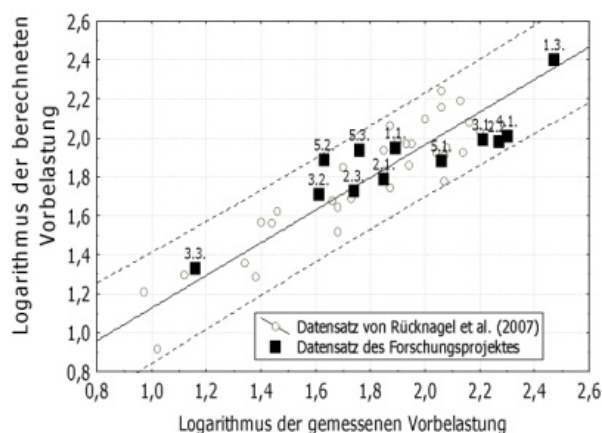


Abb. 4: Gemessene und nach Gleichung (1) berechnete Vorbelastungen (Logarithmus) für den Datensatz von Rücknagel et al. (2007) und das vorliegende Projekt

Literatur

- DIN 19682-10 (2007): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges.
- Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C., (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA Texte 46-04.
- Rücknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O., (2007): Estimating pre-compression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. Soil Till. Res. 92: 213-220.