

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der
DBG - Kommission I

Titel der Tagung: Böden verstehen - Böden
nutzen - Böden fit machen

Veranstalter: DBG, 03.-09.09.2011, Berlin

Berichte der DBG (nicht begutachtete
Online-Publikation)

<http://www.dbges.de>

Ein einfaches Modell zur Abschätzung der Veränderung der mechanischen Vorbelastung als Funktion des Wasser- gehaltes auf Basis der Vorbelas- tung bei Feldkapazität

J. Rücknagel, O. Christen, B. Hofmann,
S. Ulrich¹

Zusammenfassung

Zur Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden sollte die mechanische Vorbelastung für eine breite Spanne des Bodenwassergehaltes bekannt sein. Die standortspezifische Bestimmung von Beziehungen zwischen der Vorbelastung und dem Wassergehalt ist jedoch sehr aufwändig. Deshalb wird die Ableitung sowie Überprüfung eines einfachen Modells vorgestellt, mit dem die Vorbelastung stufenlos für abnehmende Bodenwassergehalte in Prozent der Feldkapazität und der Ausgangsvorbelastung bei Feldkapazität berechnet werden kann. Das Modell basiert zunächst auf der Auswertung zahlreicher Literaturarbeiten, in denen die Vorbelastung bei unterschiedlichen Wasserspannungen bestimmt wurde. Analog dazu wurden im Labor Beziehungen zwischen der Vorbelastung bei einer Wasserspannung von -6 kPa und dem relativen Wassergehalt in % der Feldkapazität bei höheren Wasserspannungen abgeleitet. Aus diesen Daten wurde ein mathematisches Modell für vier Texturklassen und insgesamt für „Alle Böden“ entwickelt.

Das Modell wurde durch Druck-Setzungsversuche und die Bestimmung der Vorbelastung an 25 Standorten überprüft. Alle Druck-Setzungsversuche wurden zunächst bei einer Wasserspannung von -6 kPa durchgeführt. Parallel dazu erfolgten Versuche mit höheren Wasserspannungen (-10 bis -1500 kPa). Die Genauigkeit des vorgestellten Modellansatzes ist sowohl bei der Nutzung der Gleichungssysteme für „Alle Böden“ als auch nach differenzierten Texturklassen gut.

Schlüsselworte: Bodenwassergehalt, mechanische Vorbelastung, Modellierung

Einleitung und Zielstellung

Die mechanische Vorbelastung ist ein wichtiges Kriterium für die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. In zahlreichen Arbeiten wird sie für eine Wasserspannung von -6 kPa, entsprechend der Feldkapazität bestimmt (u.a. Peth und Horn, 2006). Bei diesem Bodenwassergehalt ist die höchste Verdichtungsgefährdung gegeben. Der Bodenwassergehalt kann im Jahresverlauf aber erheblichen Schwankungen unterliegen, so dass für die Bewertung des Verdichtungsrisikos von Ackerböden oft eine Abschätzung der Vorbelastung bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten erfolgen muss. Bisher werden dafür überwiegend Druck-Setzungsversuche bei unterschiedlichen Wasserspannungen durchgeführt und standortspezifische Beziehungen zwischen der Vorbelastung und der Wasserspannung ermittelt (u.a. Arvidsson et al., 2003). Diese Versuche sind sehr aufwändig und deshalb nur für eine begrenzte Anzahl von Standorten durchführbar. Zudem weisen insbesondere kommerziell und damit einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stehen Wasserhaushaltsmodelle (z.B. vom Deutschen Wetterdienst) die Wassergehalte nicht als Wasserspannungs- sondern als Prozentwerte aus. Deshalb wurde ein einfaches Regressionsmodell entwickelt, mit dem die Vorbelastung stufenlos für abnehmende Bodenwassergehalte und verschiedene Texturklassen (USDA-Klassifikation) berechnet werden kann. Dazu sind lediglich eine initiale Vorbelastung bei Feldkapazi-

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

tät und der jeweilige Bodenwassergehalt in Prozent der Feldkapazität notwendig. Das beschriebene Modell findet bereits Anwendung im Modul zur Analyse der Schadverdichtungsgefährdung der Software REPRO (Rücknagel und Christen, 2009), in Teilen des C/N-Simulationsmodell CANDY (Franko et al., 2007) sowie in einem deutschlandweit angewandten Prüfkonzept zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden (Lebert, 2010).

Modellableitung

Das Prinzipielle Vorgehen zur Ableitung der Regressionsfunktion ist am Beispiel für „Alle Böden“ in Abbildung 1 schematisch dargestellt:

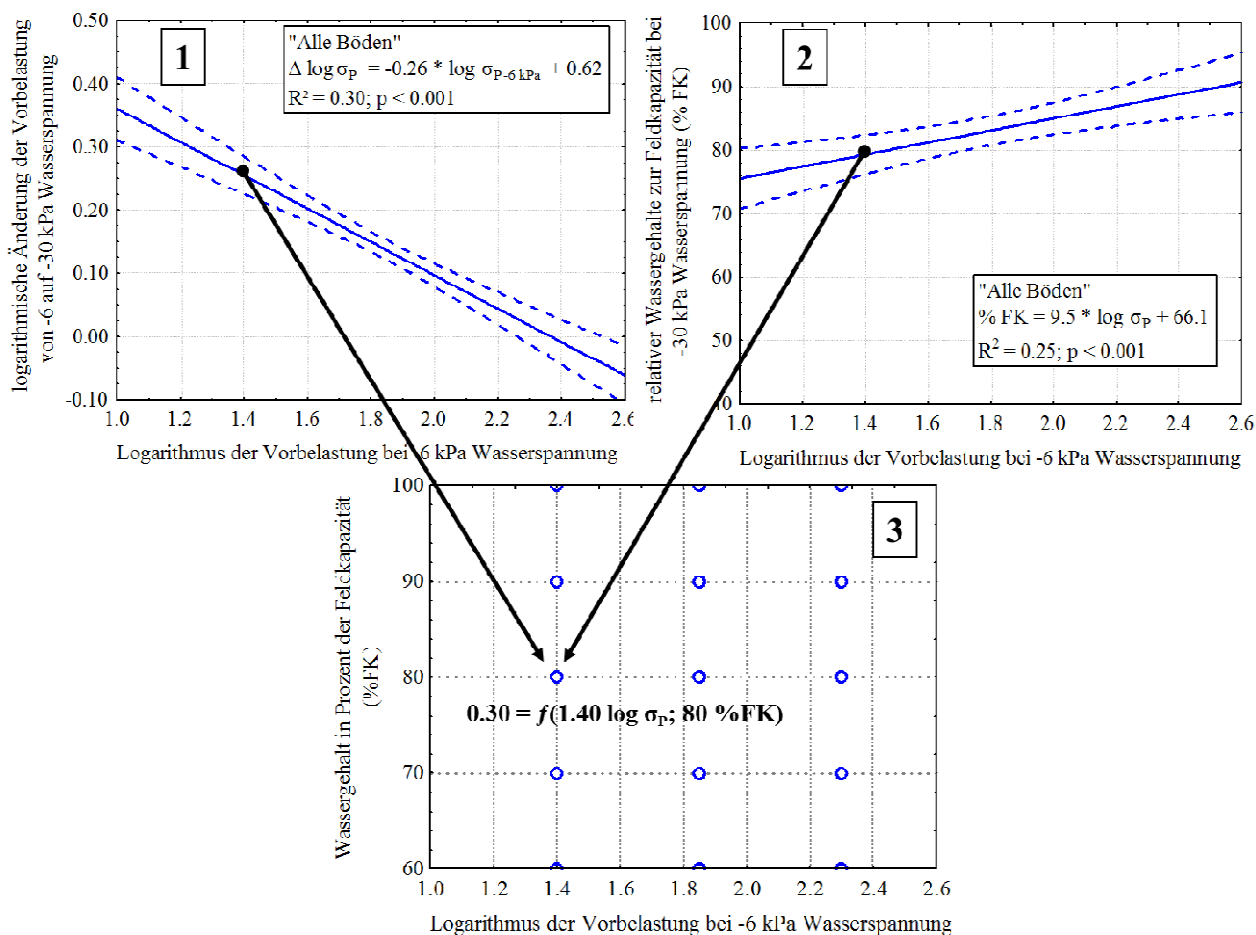


Abb. 1: Schema zur Ableitung des Regressionsmodells für „Alle Böden“

Im ersten Schritt wurde anhand von Literaturdaten (u.a. Lebert, 1989; Arvidsson et al., 2003; Keller et al., 2004) für verschiedene Ausgangsvorbelastungen (-6 kPa Wasserspannung) zunächst die Zu-

nahme der Vorbelastung bei Änderung der Wasserspannung auf -30 kPa ermittelt. Im Beispiel der Abbildung 1[1] nimmt die Ausgangsvorbelastung von log 1.40 um log 0.30 zu. Die Vorbelastung bzw. deren Änderung wird in logarithmischer Form angegeben, da sie bei Verwendung der Einheit kPa eine rechtsschiefe Häufigkeitsverteilung aufweist.

Es fehlt nun die zugehörige relative Änderung des Wassergehaltes (Abb. 1[2]). Sie wird anhand von Laboranalysen aus dem Zusammenhang zwischen der Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung und dem relativen Wassergehalt bei -30 kPa Wasserspannung ermittelt. Der relative Wassergehalt wird der Vorbelastung bei -6 kPa zugeordnet, weil diese als unabhängige Variable im Modell Verwendung

findet. Der Wassergehalt beträgt am Beispiel entsprechend 80 % des Wasserhaltes bei der Wasserspannung von -6 kPa (=80 %FK). Es ergibt sich somit ein erster Datenpunkt für das Regressionsmodell. Die Zunahme der Vorbelastung (abhängige Variable) beträgt bei einem Ausgangswert bei Feldkapazität von log

1.40 und Abnahme des Wassergehaltes auf 80 % der Feldkapazität 0.30: $0.30 = f(1.40 \log \sigma_P; 80 \%FK)$.

Um ein stufenloses statistisches Modell zu berechnen, wurden so insgesamt 15 Datenpunkte ermittelt (Abb. 1[3]). Eine befriedigende Ableitung der Datenpunkte auch für größere Wasserspannungen war anhand der Literaturdaten nicht möglich. Deshalb wurden alle Datenpunkte die nicht aus den Beziehungen der Abbildung 1[1] und 1[2] ermittelt werden konnten linear interpoliert. So beträgt die Zunahme der Vorbelastung im Beispiel bei 90 %FK 0.15 und bei 70 %FK 0.45. Dieses Vorgehen ist eine sehr starke Vereinfachung, weil der Zusammenhang der relativen Änderung des Wassergehaltes und der Änderung der Vorbelastung nicht zwangsläufig linear ist. Es dient aber der Modellvereinfachung und dem Ziel hoher Praktikabilität.

Modellgleichung

Das Regressionsmodell berechnet die Zunahme z der mechanischen Vorbelastung (Logarithmus) aus den Parametern Bodenwassergehalt in Prozent der Feldkapazität (%FK) und Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung ($\log \sigma_{P-6kPa}$) nach der Gleichung:

$$z = a + b \cdot \log \sigma_{P-6kPa} + c \cdot \%FK + d \cdot \%FK^2 + e \cdot \log \sigma_{P-6kPa} \cdot \%FK \quad (1)$$

Die Vorbelastung (Logarithmus) bei einem beliebigen Wassergehalt berechnet sich dann aus der initialen Vorbelastung bei Feldkapazität ($\log \sigma_{P-6kPa}$) zuzüglich der wassergehaltsabhängigen Änderung (z) der Vorbelastung:

$$\log \sigma_P = \log \sigma_{P-6kPa} + z \quad (2)$$

Um dem Verhalten der unterschiedlichen Bodenarten (USDA-Klassifikation) Rechnung zu tragen, wurde das Modell für „Alle Böden“ und für verschiedene Bodenarten differenziert. In der Tabelle 1 sind die Konstanten (a, b, c, d, e) zur Berechnung der Zunahme z nach Gleichung (1) für „Alle Böden“ und die unterschiedlichen Bodenarten angegeben.

Tab. 1: Konstanten zur Berechnung der Zunahme der Vorbelastung für unterschiedliche Bodenarten und „Alle Böden“

Textur	Konstante		
	a	b	c
Alle Böden	2.8335	-0.9271	-0.0279
Loam, Sandy Loam	2.7833	-1.0000	-0.0278
Clay, Clay Loam	4.3056	-1.4444	-0.0431
Silty Clay Loam, Silty Clay	2.5333	-0.6667	-0.0253
Sand, Silt, Silt Loam, Loamy Sand	1.7611	-0.5556	-0.0176

Textur	Konstante	
	d	e
Alle Böden	$1.67 \cdot 10^{-7}$	0.00906
Loam, Sandy Loam	$-116 \cdot 10^{-15}$	0.01000
Clay, Clay Loam	$-537 \cdot 10^{-16}$	0.01440
Silty Clay Loam, Silty Clay	$21 \cdot 10^{-14}$	0.00667
Sand, Silt, Silt Loam, Loamy Sand	$4.11 \cdot 10^{-14}$	0.00556

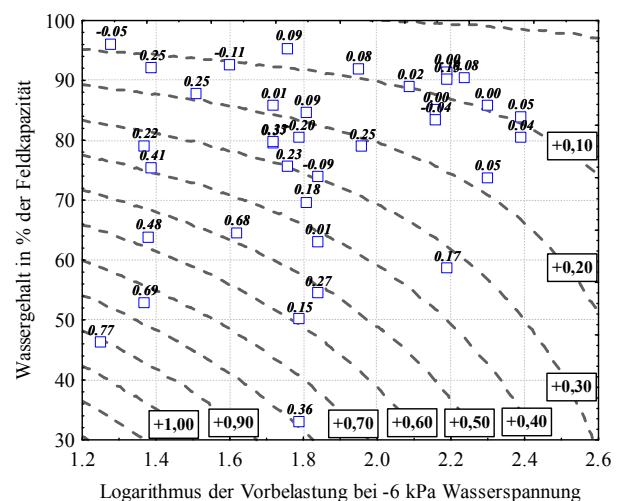


Abb. 2: Regressionsmodell (gestrichelte Linien) für „Alle Böden“ mit den untersuchten Proben zur Validierung des Modells (blaue Punkte)

Abbildung 2 veranschaulicht das Regressionsmodell für „Alle Böden“ mit den untersuchten Proben zur Validierung des Modells (blaue Punkte) graphisch.

Modellvalidierung

Grundlage der Modellvalidierung sind Druck-Setzungsversuche (drainierte Bedingungen; Druckstufen 5-550 und z.T. bis 2500 kPa; Belastungszeit 180 Minuten je Druckstufe mit anschließender Entlastungsphase von jeweils 15 Minuten) an 21 Standorten (Ton 1-55 M.-%, Sand 3-96 M.-%) mit natürlicher Lagerung des Bodengefüges und vier gestörten Varianten (gesiebter Boden mit einem Aggregatdurchmesser <10 mm wurde in die Stechzylinder eingebaut). Die Druck-Setzungsversuche wurden für jede Probe zunächst bei einer Wasserspannung von -6 kPa durchgeführt. Parallel dazu erfolgten Versuche mit höheren Wasserspannungen (-10 bis -1500 kPa). Die Druck-Trockenrohdichtefunktionen dienen zur Ermittlung der Vorbelastung mit dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936) durch mehrere unabhängige Versuchspersonen (Rücknagel et al., 2010).

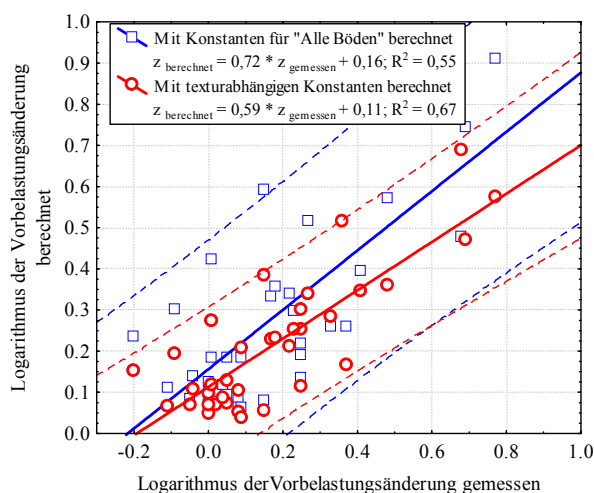


Abb. 3: Vergleich von gemessenen und nach den Gleichungen für „Alle Böden“ bzw. in Abhängigkeit der Bodenart berechneten Änderungen der Vorbelastung

Die Genauigkeit des vorgestellten Modells ist sowohl bei der Nutzung der Gleichungssysteme für „Alle Böden“ als auch nach differenzierten Texturklassen gut (Abb. 3). Die statistischen Funktionen im Vergleich der gemessenen und berech-

neten Werte verlaufen dabei flacher als die theoretische 1:1 Linie und schneiden die Abszisse etwas über dem Nullpunkt. Die Änderungen der Vorbelastung werden somit im niedrigen Bereich etwas überschätzt und im hohen Bereich unterschätzt. Mit der Berechnung nach Texturklassen lassen sich im Vergleich zu „Alle Böden“ die mittleren absoluten Abweichungen (MAE) von 0.15 auf 0.11 bzw. der RMSE von 0.19 auf 0.14 reduzieren. Eine Berechnung nach unterschiedlichen Texturklassen ist somit besonders bei Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen zu empfehlen.

Literatur

Arvidsson, J., Sjöberg, E. & J.J.H. van den Akker (2003): Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. *Soil and Tillage Research* 73, 77-87.

Casagrande, A. (1936): The determination of preconsolidation 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.

Franko, U., Kuka, K., Romanenko, I.A. & V.A. Romanenkov (2007): Validation of the CANDY model with Russian long-term experiments. *Reg. Environ. Change* 7, 79-91.

Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B. & A.J. Koolen (2004) Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress - displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research* 77, 97-108.

Lebert, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth: Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Band 12.

Lebert, M. (2010): Development of a test concept to assess the real vulnerability to compaction of agricultural soils. UBA-Texte 51/2010.

Peth, S. & R. Horn (2006): The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 401-410.

Rücknagel, J. & O. Christen (2009): Use of the information system REPRO to assess physical aspects of soil fertility. *ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings*, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T1-032, 1-6.

Rücknagel, J., Brandhuber, R., Hofmann, B., Lebert, M., Marschall, K., Paul, R., Stock, O. & O. Christen (2010): Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil & Tillage Research* 106, 165-170.