

Terranimo[®] - Bodendruckberechnung online (M. Stettler, HAFL, Zollikofen)

1. Was ist Terranimo[®] und was wird damit bezweckt?

Terranimo[®] ist ein Computermodell zur Beurteilung des Bodenverdichtungsrisikos beim Einsatz von landwirtschaftlichen Fahrzeugen und im Internet gratis verfügbar unter www.terranimoch.ch. Terranimo[®] richtet sich in erster Linie an Landwirte, Lohnunternehmer, Berater und Vollzugsorgane, soll aber auch wissenschaftliche Anwendungen erlauben. Terranimo[®] soll helfen, den Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen im Feld zu optimieren und Schäden an der Bodenstruktur zu verhindern indem es aufzeigt, unter welchen Einsatzbedingungen ein hohes Risiko für schädliche Bodenverdichtungen auftritt.

2. Wer steckt hinter Terranimo[®]?

Terranimo[®] ist ein internationales Projekt. Das Kernteam besteht aus Wissenschaftlern der Schweiz und Dänemark. In der Schweiz arbeiten Thomas Keller von der Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz und Matthias Stettler von der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, einem Departement der Berner Fachhochschule BFH, an Terranimo[®]. In Dänemark sind es Per Schjønning, Mathieu Lamandé und Poul Lassen vom Department of Agroecology der Aarhus University am Research Centre Foulum in Tjele.

3. Das Grundprinzip von Terranimo[®]

Der Grundgedanke von Terranimo[®] ist einfach und nicht neu: Die mit landwirtschaftlichen Maschinen erzeugte Bodenbelastung (Bodendruck) wird mit der Widerstandsfähigkeit des Bodens (Bodenfestigkeit) verglichen (Abb. 1).



Abbildung 1: Das Grundprinzip von Terranimo[®], der Vergleich von Bodendruck und Bodenfestigkeit.

Ist die Bodenfestigkeit höher als die Bodenbelastung, so sind keine bleibenden Deformationen und somit keine Bodenschäden zu erwarten. Im umgekehrten Fall sind Bodenverdichtungen unvermeidlich und das Befahren des Bodens sollte unterlassen werden.

Die Einschätzung von Bodenbelastung und Bodenfestigkeit ist allerdings ziemlich kompliziert. Terranimo[®] liefert auf Grund von wichtigen Einflussgrößen eine möglichst exakte Abschätzung des Verdichtungsrisikos. Um verschiedenen Nutzeransprüchen gerecht zu werden, existieren zwei Modell-Versionen: Terranimo[®] light für die einfache und schnelle Grobbeurteilung und

Terranimo[®] expert für die umfassende Analyse des Verdichtungsrisikos bei spezifischen Bedingungen.

4. Terranimo[®] light: Risikoeinschätzung leicht gemacht

Terranimo[®] light ermöglicht eine rasche Einschätzung des Bodenverdichtungsrisikos mittels vier Kennwerten: Radlast, Reifendruck, Bodenfeuchtigkeit und Tongehalt.

Radlast und Reifendruck dienen als Eingangsgrößen zur Berechnung des Bodendrucks in 35 cm Bodentiefe. Der Wert von 35 cm lehnt sich an den bestehenden Bodenschutzvollzug im Baubereich an und liegt darin begründet, dass in erster Linie der Unterboden vor Verdichtungen zu schützen ist, da hier Bodenschäden nur sehr schwer behoben werden können.

Die Bodendruck-Berechnungsformel basiert auf Befahrungsversuchen in Dänemark mit verschiedenen Reifen und bei unterschiedlichen Radlast- und Reifendruck-Konstellationen (Schjønning et al. 2012). Bei den Auswertungen zeigte sich, dass Radlast und Reifendruck den Bodendruck ziemlich genau beschreiben, unabhängig von Reifenmarke und -typ. Dieser Zusammenhang kann in Form eines Nomogrammes dargestellt werden (Abb. 2). Der Bodendruck nimmt mit steigender Radlast und steigendem Reifendruck zu.

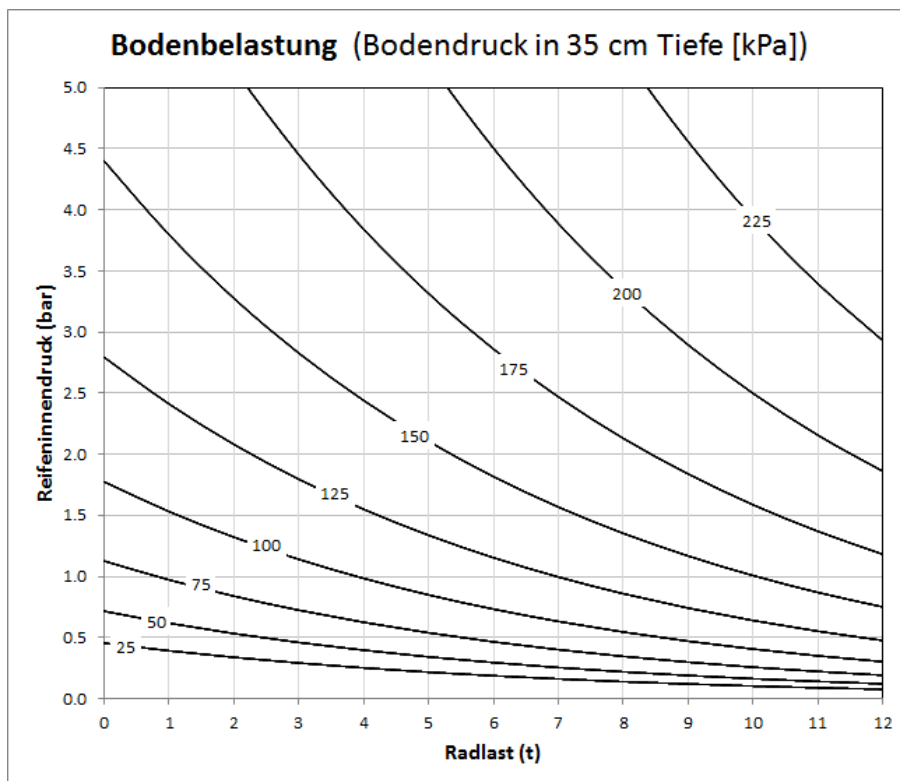


Abbildung 2: Bodendrucknomogramm (verändert nach Schjønning et al. 2012): Die Isolinien zeigen den Druck in 35 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von Radlast und Reifendruck.

Die Bodenfestigkeit kann mit der Saugspannung, einem Maß für die Feuchtigkeit eines Bodens, und dem Tongehalt abgeschätzt werden. Als Grundlage für die entsprechende Berechnungsfunktion dienten Ödometer-Messungen (Kompressionstests zur Bestimmung der Druck-Setzungsbeziehung) im Labor an rund 500 Bodenproben aus Dänemark, bei mindestens drei unterschiedlichen Saugspannungen (5, 10 und 30 cbar) und bei Tongehalten zwischen 5-18%. Wie aus dem entsprechenden Nomogramm ersichtlich wird (Abb. 3), sind die

Abhängigkeiten hier etwas komplexer als beim Bodendruck: Die Saugspannung hat je nach Tongehalt unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Bodenfestigkeit. Leichte Böden mit tiefem Tongehalt sind bei feuchten Bedingungen (Saugspannung < 10 cbar) grundsätzlich zwar stabiler als schwere Böden, erfahren aber mit zunehmender Austrocknung viel geringfügigere Festigkeitszunahmen als tonreiche Böden. Nahe der Feldkapazität (Saugspannung rund 10 cbar) ist der Einfluss des Tongehaltes relativ gering. Dieses Prinzip konnte mit Ödometerdaten aus der Schweiz validiert werden.

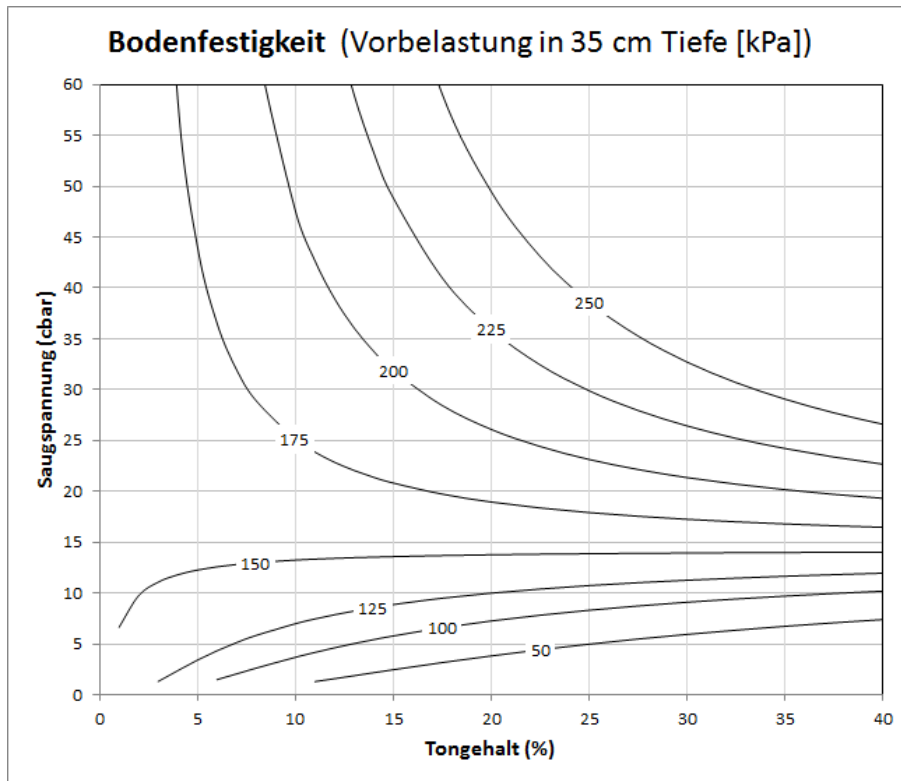


Abbildung 3: Bodenfestigkeitsnomogramm (verändert nach Schjønnning, unveröffentlicht): Die Isolinien zeigen die Vorbelastung in 35 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von Tongehalt und Saugspannung.

Die gemäss obigen Ausführungen ermittelten Werte für Bodendruck und Bodenfestigkeit werden in Terranimo[®] light auf das dreifarbige Entscheidungsdiagramm (Abb. 4) übertragen. Damit findet die eigentliche Risikobeurteilung statt: Die aktuelle Verdichtungsgefährdung wird einer von drei Gefährdungsstufen (grün, gelb oder rot) zugeordnet. Die Farben sind wie folgt zu verstehen:

- Grün: Dieser Bereich zeigt keine Verdichtungsgefährdung an, d.h. der Boden kann im aktuellen Feuchtezustand gefahrlos mit dem ausgewählten Fahrzeug befahren werden.
- Gelb: Der gelbe Bereich zeigt den kritischen Übergangsbereich mit einer beträchtlichen Verdichtungsgefährdung. Die Gefährdungsabschätzung kann hier durch die Kenntnis zusätzlicher Bodeneigenschaften präzisiert werden. Zum Beispiel sinkt die Gefährdung bei hohen Skelettgehalten (> 10 % Steine im Unterboden) und bei Böden mit einer guten Struktur (z.B. dank konservierender Bodenbearbeitung, intensiver Durchwurzelung, hohem Humusgehalt oder guter Kalkversorgung). Auf jeden Fall sollten die Möglichkeiten zur Belastungsreduktion genutzt werden (z. B. Reifeninnendruck herabsetzen, Bunker nur teilweise füllen oder Doppellräder montieren).

- Rot: Der rote Bereich zeigt an, dass eine Schadverdichtung im Unterboden zu erwarten ist. Das Befahren des Bodens ist zu unterlassen, ausser es können geeignete Sofortmassnahmen umgesetzt werden, die die Verdichtungsgefährdung auf die Stufe Gelb herabsetzen (z.B. Reduktion der Radlast oder des Reifeninnendrucks).

Die Grenze grün-gelb entspricht einem Bodendruck von 50% der Bodenfestigkeit. Diese Grenze repräsentiert gemäss aktuellem Kenntnisstand den Übergang vom vollkommen elastischen Verhalten des Bodens (keine bleibenden Schäden) zu ersten plastischen Deformationen der Bodenstruktur (beginnende Bodenverdichtung, Keller et al. 2012). Die Grenze gelb-rot liegt bei einem Bodendruck von 110% der Bodenfestigkeit. Im roten Bereich müssen aufgrund der bisherigen Ergebnisse aus Befahrungsversuchen beträchtliche plastische Deformationen (und damit Schadverdichtungen) erwartet werden.

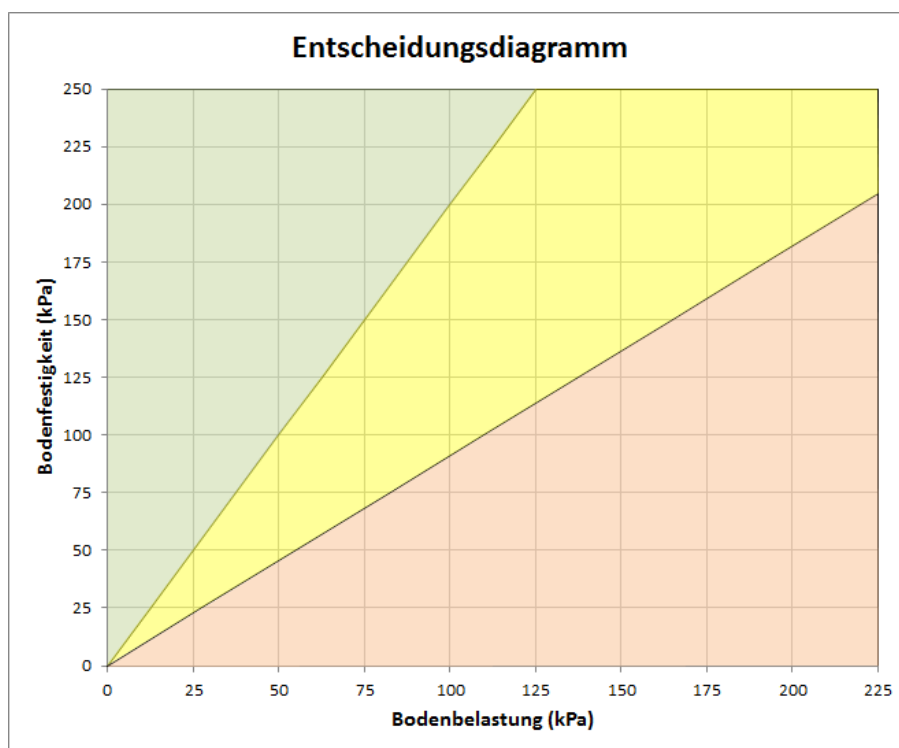


Abbildung 4: Das Entscheidungsdiagramm in Terranimo[®] light zur Gegenüberstellung von Bodendruck und Bodenfestigkeit und zur Abschätzung des Verdichtungsrisikos in drei Stufen (grün, gelb, rot).

5. Terranimo[®] expert: umfassende Analyse der Bodenbeanspruchung

Terranimo[®] expert ist deutlich komplexer als Terranimo[®] light und ist als Tool zu verstehen, welches Experten erlaubt, spezifische Befahrungssituationen zu simulieren. Terranimo[®] expert besteht aus vier Teilmodellen:

- (1) Obere Modellrandbedingung: Kontaktfläche und Druckverteilung zwischen Reifen und Boden;
- (2) Druckausbreitung im Boden;
- (3) Abschätzung der Bodenfestigkeit im Bodenprofil;
- (4) Beurteilung des Verdichtungsrisikos aufgrund des berechneten Druckes und der vorherrschenden aktuellen Bodenfestigkeit.

Die Berechnung der oberen Modellrandbedingung basiert auf dem Modell „FRIDA“ (Schjønning *et al.*, 2008), welches die Kontaktfläche und die Spannungsverteilung zwischen Reifen und Boden simulieren kann. Der Umriss der Kontaktfläche wird durch eine Super-Ellipse beschrieben, die Spannungsverteilung in Fahrtrichtung wird mit einer Potenz-Funktion und diejenige senkrecht zur Fahrtrichtung mit einer exponentiellen Zerfalls-Funktion modelliert. FRIDA kann die realen Verhältnisse sehr gut abbilden, insbesondere den dominierenden Einfluss des Reifeninnendruckes (Abb. 5).

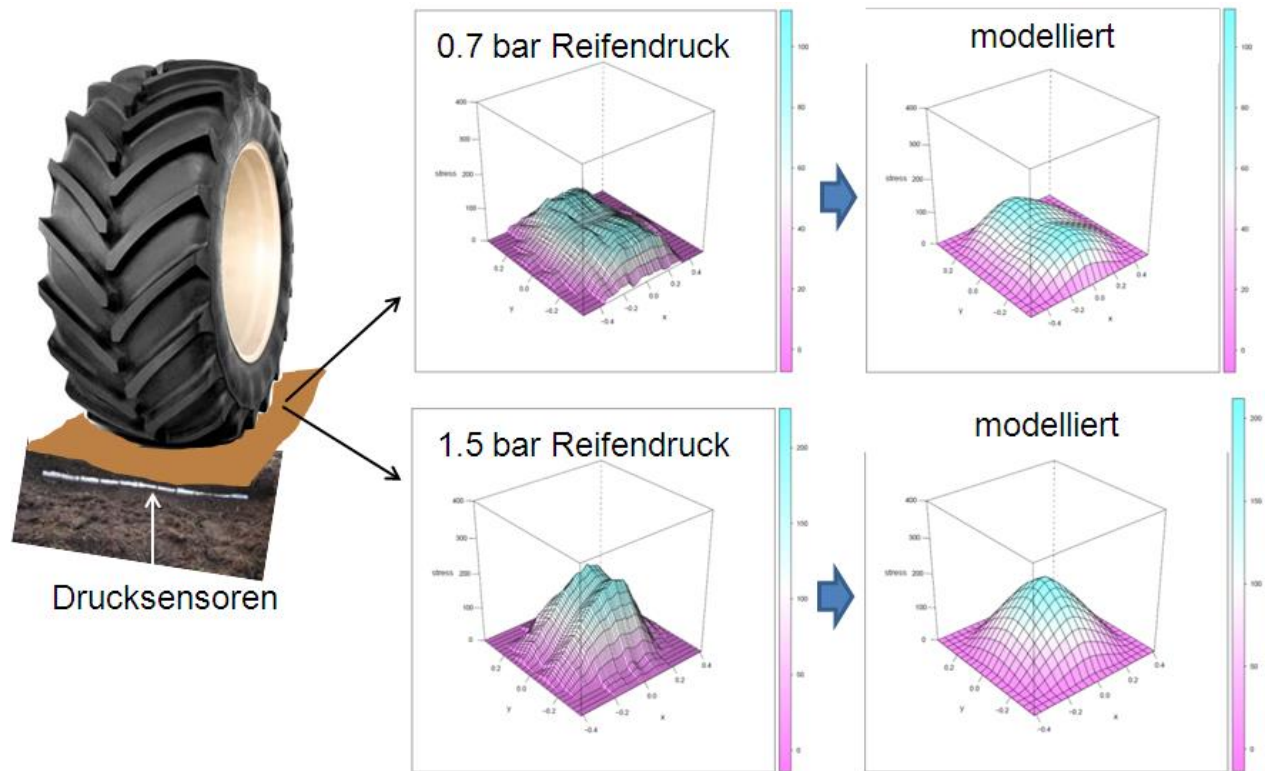


Abbildung 5: Gemessene (Diagramme links) und mit FRIDA modellierte Zustände zwischen Reifen und Boden bei unterschiedlichem Reifeninnendruck. Hier am Beispiel eines Michelin MultiBib 650/65R38 mit 3.5 t Radlast.

Um FRIDA auch für nicht experimentell untersuchte Reifen nutzen zu können wurden Schätzfunktionen für die Ableitung der verschiedenen FRIDA-Modellparameter entwickelt, so dass aus einfach verfügbaren Reifendaten (Reifenbreite, Reifendurchmesser, empfohlener Reifendruck gemäss Hersteller und tatsächlich eingestellter Reifendruck), der Radlast und dem Oberbodenzustand die Kontaktdruckverhältnisse für beliebige Reifen dargestellt werden können.

Um die Eingabe der Reifendaten zu vereinfachen und zu beschleunigen, wurde eine Datenbank für gängige Reifenmarken und –modelle angelegt. Die Datenbank umfasst mittlerweile über 1000 Reifen der Marken Alliance, Continental, Goodyear, Kléber, Michelin, Nokian, Trelleborg und Vredestein mit sämtlichen verfügbaren technischen Daten gemäss ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation).

Die Druckausbreitung wird in Terranimo[®] analytisch berechnet, basierend auf den Formeln von Boussinesq (1885), Fröhlich (1934) und Söhne (1953). Ein wichtiges Element dieser Theorie ist der Konzentrationsfaktor, ν . Er bestimmt die Form der Druckausbreitung im Boden (Abb. 6).

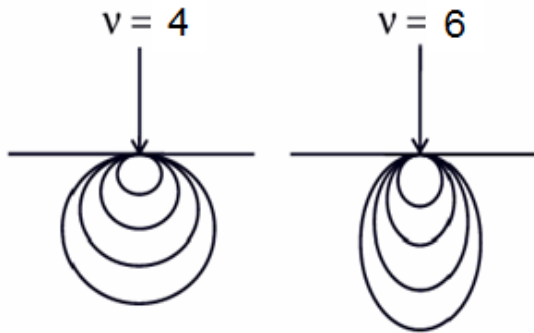


Abbildung 6: Die Druckzwiebeln bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren ν .

In Terranimo[®] expert wird der Konzentrationsfaktor in Abhängigkeit der Bodenfestigkeit gewählt, wie bereits von Söhne (1953) vorgeschlagen: Bei weichem (nassem) Boden rechnet man mit $\nu = 6$, bei hartem (trockenem) Boden mit $\nu = 4$ und bei mittlerem Zustand (feuchter Boden) mit $\nu = 5$.

Die Bodenfestigkeit wird in Terranimo[®] expert analog Terranimo[®] light berechnet und das entsprechende Verdichtungsrisiko wird ebenfalls im dreifarbigem Entscheidungsdiagramm dargestellt. Zusätzlich bietet Terranimo[®] expert aber noch Grafiken zur Druckausbreitung und Druckzwiebeln zur Darstellung der Druckdifferenz zwischen ausgeübtem Bodendruck und dem aktuellen Vorbelastungswert des Bodens. Mit Hilfe dieser Auswertungen kann im Gegensatz zu Terranimo[®] light das Verdichtungsrisiko über das gesamte Bodenprofil evaluiert werden und ist nicht auf die Referenztiefe von 35 cm begrenzt.

Literatur

- Boussinesq J. 1885. Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars, Paris, 30 pp.
- Fröhlich O.K. 1934. Druckverteilung im Baugrunde. Springer Verlag, Wien, 178 pp.
- Keller T. 2004. Soil Compaction and Soil Tillage – Studies in Agricultural Soil Mechanics. Doctoral Thesis. Agraria 489, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 75 pp.
- Keller T. 2005. A model for prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily-available tyre parameters. Biosystems Engineering 92, 85-96.
- Keller T. & Lamandé M. 2010. Challenges in the development of analytical soil compaction models. Soil & Tillage Research, 111, 54-64.
- Keller T., Lamandé M., Schjønning P. & Dexter A.R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. Geoderma 163, 13-23.
- Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F.A., Pedersen J. & Hansen P.O.M. 2006. Reduction of soil compaction. Magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil. Report Markbrug No. 127. The Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele, Denmark, 102 pp.
- Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F.A., Arvidsson J. & Keller T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. Biosystems Engineering 99, 119-133.
- Schjønning P., Lamandé M., Keller T., Pedersen J. & Stettler M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. Soil Use and Management, 28(3), 378-393.
- Söhne W. 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik 5, 49-63.