

## Teil IV: Ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen

Joachim Brunotte\* Thomas Vorderbrügge\*\*, Klaus Nolting\* und Claus Sommer\*

### Zusammenfassung

Der Einsatz heutiger Maschinen und Geräte bei der Landbewirtschaftung birgt die Gefahr von Bodenschadverdichtungen, die eine Beeinträchtigung von Bodenfunktionen zur Folge haben.

Erkenntnisse aus Bodendauerbeobachtungsflächen, regionalen Statuserhebungen und systematischen Belastungsversuchen sind notwendig, um Verbreitung und Brisanz von Bodenschadverdichtungen einzuschätzen und Handlungsempfehlungen für vorsorgenden Bodenschutz abzuleiten.

Der in diesem Beitrag vorgestellte Lösungsansatz basiert auf Belastungsversuchen über einen Zeitraum von 15 Jahren mit praxisorientierter Landtechnik auf Parabraunerden.

Für das Betriebsmanagement wird als erstes eine Entscheidungsmatrix vorgestellt, die sowohl bei Investitionen als auch bei der Planung des Maschineneinsatzes Hilfestellung bietet. Zur Verfügung stehende Feldarbeits- bzw. Befahrbarkeitstage der Region werden dabei berücksichtigt.

Der zweite Baustein des vorgeschlagenen Lösungsansatzes ist die Kontrolle während des Maschineneinsatzes. Die aktuelle Verdichtungsgefährdung wird mittels einer eigens entwickelten hydrostatischen Setzungsmessung abgegriffen. Eine damit gekoppelte Online-Messung der Spurtiefe ist für den Maschinenführer die Anzeige einer kritischen bzw. unkritischen Befahrung. In kritischer Situation werden Fahrzeugparameter in Richtung Minderung des Bodendruckes abgeändert, etwa mit Hilfe eines Ultraschallsensors zur Überwachung der Reifenverformung (-einfederung) bei der Reduzierung des Reifeninnendruckes.

Mit dem vorgestellten Lösungsansatzes gelingt es, aus der aktuellen Verdichtungsgefährdung von Böden Handlungsempfehlungen abzuleiten und umzusetzen. Sie gewährleisten damit für den Betrieb ein Höchstmaß an vorsorgendem Bodenschutz.

*Schlüsselworte: Statuserhebung Bodengefüge, Belastungsversuche, vorsorgender Bodenschutz, gute fachliche Praxis, Anpassung von Maschinen an Verdichtungsempfindlichkeit, Befahrbarkeitssensor*

### Abstract

#### **Part IV: A practice oriented solution-approach to prevent detrimental soil compaction**

The use of modern machines and equipment in farming carries with it the potential danger for soil compaction, and as a consequence, a reduction of soil functions.

Knowledge drawn from long term soil observation areas, regional status surveys and systematic stress studies are essential to assess the level and acuteness of soil compaction damages and to derive recommendations for preventative soil protection.

The solution-approach introduced in this paper is based on stress tests over a period of 15 years with practice oriented agricultural technology on para-brown soils.

For farm management, at first a decision matrix is presented that offers assistance at both the investment and planning level for farm machinery.

The available field working days and days of trafficability in a given region are considered.

The second building block in the recommended solution approach is the monitoring during the deployment of machinery. The current compaction hazard is monitored with a specially developed hydrostatic settlement measuring tool. The online measurement coupled to the track depth is, for the driver, a sign of a critical or uncritical passage. In critical situations vehicle parameters are changed in a direction to reduce soil pressure, for instance with the help of an ultrasonic sensor in the tire rims to observe the tire deflection when reducing the inflation pressure.

With the presented solution-approach it is possible to draw treatment recommendations based on the actual compaction hazard to the soil and to implement them. Thus they provide the farm with a maximum of preventive soil protection.

*Keywords: Status census for soil structure, soil load experiments, preventive soil protection, good practice, adaptation of vehicle parameters, compaction sensitivity, trafficability sensor*

\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: joachim.brunotte@vti.bund.de

\*\* Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dezernat Bodenschutz und Bodeninformationen, Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden; E-Mail: thomas.vorderbruegge@hlug.hessen.de

## 1 Einleitung

Es liegt im Interesse des Landwirts und wird seit Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 1998) auch vom Gesetzgeber verlangt, dass die Landwirtschaft Vorsorgepflichten erfüllt und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu berücksichtigen hat. U.a. ist also Bodenschadverdichtung durch Befahren des Bodens mit heute üblichen Radlasten vorzubeugen.

Für den Landwirt sind bisher Handlungsempfehlungen und Schutzmaßnahmen zur „guten fachlichen Praxis“ (BMVEL, 2001) die Basis zur Vorbeugung oder Minderung von Bodenschadverdichtungen. Bodenschonende Maßnahmen zur Maschinenauswahl und zum Maschineneinsatz im Hinblick auf die Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden wurden inzwischen konkretisiert (VDI-Richtlinie 6101, 2007; Brandhuber et al., 2008).

Was aus praxisorientierter Sicht bisher fehlt, ist zunächst eine **Entscheidungshilfe**, die in die jeweils relevanten zur Verfügung stehenden Handlungsempfehlungen und Schutzmaßnahmen eingebettet ist, sowie eine am Ende wichtige **Erfolgskontrolle** zu den durchgeführten Maßnahmen. In diesem Sinne einen Vorschlag zu unterbreiten, ist Ziel des vorliegenden Beitrages IV. Dieser steht in der Reihe mit den Beiträgen I bis III.

In den vorherigen Ausführungen dieses Sammelbeitrages wurde das seit vielen Jahren in der fachlichen Diskussion befindliche Konzept der „Schätzung der Vorbelastung“ behandelt. Es wurde aufgezeigt, dass entsprechende Ergebnisse auf Basis von Pedotransferfunktionen nur schwer reproduzierbar sind, einer statistischen Absicherung nicht standhalten, und eine Übereinstimmung zwischen Schätz- und Messwerten nicht nachweisbar ist. Weiterhin wurde dargestellt, dass die von Horn et al. (2009) vorgeschlagenen „Vorsorgewerte“ für die Vorbelastung kritisch zu hinterfragen sind. Das gleiche gilt für die Übertragbarkeit von Schätzwerten in die Fläche, d. h. insbesondere ihre Darstellung in Form von Karten zur „potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit“. Da die in Teil I und II diskutierten Transferfunktionen eine große Rolle in der aktuellen Diskussion zur Ausweisung von „Risikogebieten Bodenverdichtung“ im Sinne der Bodenschutzrahmenrichtlinie spielen, wurden in Teil III die aktuell in Europa diskutierten Ansätze zur Ausweisung der Gebiete vorgestellt.

Vor diesem Hintergrund wird in eigenen Untersuchungen seit 1995 (Brunotte et al., 2000; Brunotte et al., 2005; Brunotte, 2007; Sommer et al., 2001) ein anderer Weg beschritten: ein **Expertensystem mit Entscheidungsmatrix** für den standortangepassten Maschineneinsatz an den Anfang zu setzen und nach Durchführung von Schutzmaßnahmen eine **Erfolgskontrolle** anzuschließen. Er wird für Berater und Praktiker im Sinne einer

effizienten, standortspezifischen Umsetzung von Handlungsempfehlungen für erfolgsversprechender gehalten.

Dazu sind drei Untersuchungspfade einbezogen worden:

- Kenntnisse zum tatsächlichen Verdichtungszustand der Böden
- Ergebnisse aus Belastungsversuchen
- Entscheidungshilfemodelle

Hierzu wird im Folgenden zunächst der Sachstand dargelegt, um daraus die eigenen Untersuchungsmethoden abzuleiten und aus den Versuchsergebnissen einen **praxisorientierten Ansatz zur Lösung von Bodenschutzproblemen** zu entwickeln.

## 2 Sachstand

### 2.1 Kenntnisse zum tatsächlichen Verdichtungszustand der Böden

Seit 2002 gibt es eine Reihe von neueren Arbeiten, in denen Aussagen zur Verbreitung von Bodenverdichtung gemacht werden. Auf diese wird hier zurückgegriffen:

**Gieska et al. (2003)** verglichen Acker-, Wald- und Grünlandstandorte auf Feuchtschwarzerden in der **Hildesheimer Börde** hinsichtlich der Aggregatstabilität in Krume und Unterboden sowie die Entwicklung der Lagerungsdichte im Unterboden im Vergleich zu 1960. Hat die Aggregatstabilität eine gewisse Bedeutung für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens, so spielt sie doch grundsätzlich eine wichtigere Rolle für die physikalische Degradierung durch Bodenabtrag. Die vorgelegten Ergebnisse weisen unter Ackernutzung im Vergleich zu Grünland auch in größeren Tiefen sehr instabile Aggregate auf. Aus den Werten zur Lagerungsdichte (gewählt wurde als Bewertungsmaßstab die Proctordichte = sie gibt den Maximalwert einer Dichtlagerung an, den eine gesiebte Bodenprobe erreicht, wenn sie mittels eines genormten Laborverfahrens komprimiert wird) wurde gefolgert, dass „die untersuchten Böden mehr oder weniger flächenhaft verdichtet sind, aber eine Pflugsohlenverdichtung bereits in den 60er Jahren zu erkennen war und diese seitdem zugenommen hat.“

**Ehlers et al. (2003)** führten zwischen 1971 und 1999 im **Umkreis von Göttingen** auf lössbürtigen, schluffreichen Parabraunerden Untersuchungen bis in 160 cm Tiefe durch. Bestimmt wurde die Lagerungsdichte, ergänzt durch die Proctordichte. Sechs von zehn Profilen zeigten eine ausgeprägte Krumbasisverdichtung. Die gemessenen Verdichtungswerte führen die Autoren auf wiederholten Fahrverkehr durch ein absetziges Verfahren bei der Zuckerrüben-ernte oder auch auf eine „gewaltsam erzwungene Pflugfurche bei Nässe“ zurück.

**Harrach et al. (2003)** untersuchten langfristig nutzungsbedingte Bodendegradierungen (hier die Boden-erosion) ackerbaulich genutzter **Lössböden in Sachsen**. Das sehr umfangreiche Programm umfasste punktuelle (Profilbeschreibungen, Spatendiagnose) und flächenhafte Untersuchungen (Bonitierungen des Bodenzustandes und der Pflanzenbestände), wobei Schadverdichtungen angesprochen wurden soweit sie als Mitverursacher von Bodenabtrag gelten mussten. Diesbezüglich wurden im landwirtschaftlich intensiv genutzten mittelsächsischen Lösshügelland Schadverdichtungen „nur in Sonderfällen, nämlich auf vernässten Stellen und gehäuft auch im Vorgewende, festgestellt“. Und weiter: „Auch die systematische Bonitur der Kulturpflanzenbestände im Zusammenhang mit Bodengefügeuntersuchungen hat weder bei pflugloser noch bei konventioneller Bewirtschaftungsweise auf durchschnittlichen Ackerflächen Anhaltspunkte für das Vorliegen von Schadverdichtungen, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen, erbracht.“

**Brandhuber (2005)** berichtet über Gefügeuntersuchungen im Rahmen von Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) in **Bayern**. Hierbei wurden auf 29 Acker-BDF neben der Bodendichte und dem Porenvolumen auch die Luftkapazität, die Vorbelastung und die Aggregatstabilität direkt unterhalb der Krume in 40 cm Tiefe bestimmt, sowie eine Gefügeansprache durchgeführt. Alle untersuchten Flächen wiesen eine Krumenbasisverdichtung auf, bei der „in etwa der Hälfte der Fälle die Ausprägungen der Luftkapazität nahe am kritischen Wert von 5 Vol. %, in wenigen Fällen auch darunter lag.“ „Unterhalb der Pflugsohle liegen die Gefügewerte mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich, der auf ausreichende Funktionsfähigkeit schließen lässt.“ Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wird gefolgert, Maschinen und Arbeitsverfahren bodenschonend auszurichten und den technischen Fortschritt in der Reifen- und Fahrzeugentwicklung künftig vermehrt zur Senkung der mechanischen Belastung, insbesondere in der Pflugsohle, zu nutzen (Onlandpflügen, Konservierende Bodenbearbeitung), um die Funktionsfähigkeit des Bodengefüges zu erhalten.

**Eckert et al. (2006)** weisen darauf hin, dass Schadverdichtungen auf 16 bis 17 % der Ackerfläche **Thüringens** im Bereich der Krumenbasis und wiederum nicht schlagdeckend, sondern in den Randbereichen der Feldschläge existieren. „Unterbodenschadverdichtungen konzentrieren sich auf extreme Standorte“.

**Isensee & Schwark (2006)** überprüften, ob und inwieweit Schadverdichtungen auf Praxisflächen in **Schleswig-Holstein** nachzuweisen sind und verglichen die unterschiedlich belasteten Teilflächen Vorgewende, Fahrgasse, Kernproduktionsfläche und naturbelassenes Ödland. Im Unterboden waren in den meisten Fällen Vorgewende und Fahrgassen im Vergleich zur Kernfläche und zum Öd-

land stärker verdichtet. Auf einzelnen Zuckerrübenfeldern „fallen Schadverdichtungen an Rübenmieten und im Zufahrtbereich auf.“ Infolge zunehmender Arbeitsbreiten bei Düngung und Pflanzenschutz gibt es Hinweise, dass sich die verdichtete Bodenstruktur der alten Fahrgassen über einen längeren Zeitraum positiv entwickelt hat.

**Cramer et al. (2006)** führten von 2002 bis 2005 im Rahmen einer empirischen Erhebung bodenphysikalische, -mechanische und -chemische Untersuchungen auf landwirtschaftlichen Betrieben in **Nordrhein-Westfalen** durch. Vor dem Hintergrund, den Status der Bodenverdichtung zu beschreiben, zeigen die Ergebnisse, dass die Unterböden der untersuchten Flächen derzeit ihre Funktion der Wasser- und Luftführung erfüllen. Im Krumenbasis- und nicht gelockerten Krumenbereich sind die Böden stärker verdichtet. Unter Anwendung des Indikatorsystems nach Lebert et al. (2004) wird „auf keiner der 46 analysierten Flächen eine schädliche Bodenveränderung quantifiziert“. Und „Verdichtungen beschränken sich zurzeit nur auf den Bereich der Krumenbasis“.

**Ruhm (1983)** führte eine Staturerhebung in **Süd-niedersachsen** 1952 und 1982 durch, die **2002 nach 50 Jahren von Brunotte et al. (2008)** fortgeführt wurde. Der Vergleich der Dichtemessungen (Abbildung 1) zeigt, dass schon zu Beginn der Messungen in den 30 Jahren von 1952 bis 1982 in den von Ruhm untersuchten Regionen deutliche Verdichtungen zwischen Krume und Unterboden (= Krumenbasisverdichtungen) auftraten.

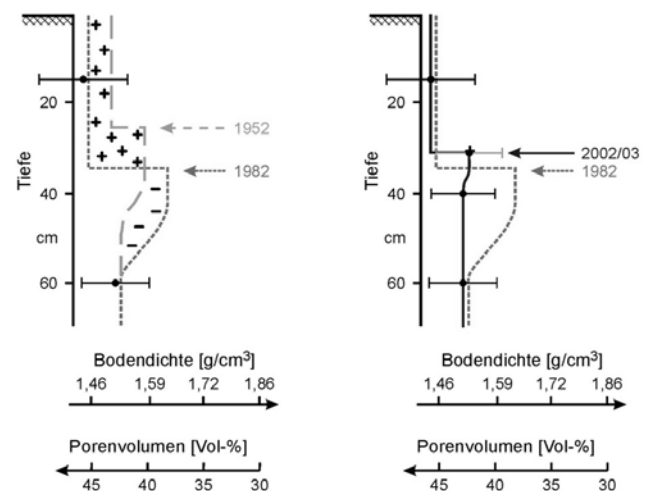


Abbildung 1:

Bodendichte und Porenvolumen als Funktion der Bodentiefe – tendenzieller Vergleich 1952 und 1982 (links), ergänzt durch 2002 (rechts) auf Standorten in Südniedersachsen.

Krumenvertiefung und Pflugarbeit mitunter bei hohem Schlupf und feuchten Bodenbedingungen haben dazu beigetragen, dass 1982 die Schlepperradschollen tiefer reichten und mächtiger waren als 1952. Die Untersu-

chungen 2002 – also 20 Jahre später – belegten, dass sich dieser Trend von 1952/1982 zu dichteren und tiefer gelagerten Bereichen der Krumbasis nicht fortgesetzt hat. Als Gründe dafür sind anzuführen: eine Zurücknahme der Bearbeitungstiefe aus Kostengründen, technische Detailverbesserungen (Radialreifen mit geringem Innendruck bei 1 bar, Schlupfregelung, Pflügen bei akzeptabler Bodenfeuchte wegen hoher Schlagkraft) und der Verzicht auf das Fahren in der Furche durch die Ausdehnung konservierender Bodenbearbeitungssysteme. Für den Vergleich über die Zeit wurde die Dichtemessung verwendet, weil sich Ruhm ausschließlich darauf konzentriert hatte. 2002 sind aber weitere Parameter nach dem Indikatorsystem von Lebert et al. (2004) berücksichtigt worden (Luftkapazität, Wasserleitfähigkeit, Feldgefügeansprache), die die Bodenfunktionen beschreiben. Für die beprobten Unterböden ist festzustellen, dass in annähernd 100 untersuchten Profilgruben der Ackerflächen aktuell keine flächenhaften Schadverdichtungen vorliegen. Bereiche der Krumbasis sind stellenweise nahe einer Schadverdichtung und sollten in Vorsorgekonzepten zum Bodenschutz besondere Aufmerksamkeit bekommen.

#### *Zwischenfazit*

*Eine der zitierten Arbeiten weist „mehr oder weniger flächenhafte Verdichtung“ aus, eine Untersuchung „ausgeprägte Krumbasisverdichtungen durch eine gewaltsam erzwungene Pflugfurche bei Nässe“ und die übrigen sechs Beiträge solche nur in Krumbasen, auf Vorgewenden und extremen Standorten. Daraus folgt: wenn der Landwirt im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes beraten werden soll, dann sind schlag- und standortspezifische Einschätzungen und Beurteilungen erforderlich.*

## 2.2 Belastungsversuche zur Quantifizierung von Gefügeveränderungen

Bei Belastungsversuchen ist die Grundlage der Vergleich „vor und nach der Befahrung“, um die Auswirkungen der jeweiligen Belastung herauszuarbeiten und quantifizieren zu können. Seit Beginn der Mechanisierung in der Landwirtschaft ist die Beeinflussung der Bodenstruktur und im Wesentlichen der Erhalt der Ertragsfunktion von Interesse. Bei den zu diesem Thema durchgeführten Versuchen wurden häufig **nichtlandwirtschaftliche Fahrzeuge** eingesetzt.

**Sommer et al. (1981)** stellten den „worst case“ mit schweren Kettenfahrzeugen (Panzer mit 40 t Gesamtgewicht) dar, die im Herbst bei hoher Bodenfeuchte eingesetzt wurden. „Die in Spuren angelegten Bodenverdichtungen hatten meistens Ertragsminderungen zur Folge, im Jahr nach der Spurlegung fast ohne Ausnahme. Im Durchschnitt klangen die Auswirkungen auf die Ernte im dritten Jahr ab.“

**Mähner (1999), Wiermann (1998) und Ehlers et al. (2000)** setzten in Göttingen und Jena als nichtlandwirtschaftliches Fahrzeug einen Kranwagen (4,8 t bei 8,8 bar Reifeninnendruck) bzw. einen Radlader (4,7 t Radlast bei 3,8 bar Reifeninnendruck) nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung ein – eine 6-fach Überrollung stellte gegenüber dem unbefahrenen Zustand die maximale mechanische Belastung dar. Der Kornertrag der Sommergerste als Folgefrucht zeigte den Effekt der Belastung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften der gepflügten Böden: 66 % Minderertrag bei maximaler Belastung. Im zweiten Anbaujahr zeigte der Winterweizen keine Nachwirkungen der Belastung mehr an. „Festbodenmulchwirtschaft kann dazu beitragen, Nebenwirkungen der Bodenbelastungen zu verringern“.

Eine Sonderform sind systematische **Versuche in der Boderrinne**, wobei ein typischer Boden bzw. ein homogenes Substrat eingefüllt wird:

**Ansorge & Godwin (2007), (2008) und (2009)** verglichen die Effekte von Reifen- und Raupenfahrwerk in einer Boderrinne mit lehmigem Sand in Silsoe und stellen den Vorteil der Bandlaufwerke bei Bodenverdichtung und -deformation gegenüber Rädern heraus. Große Reifendurchmesser und gleichmäßige Druckverteilung in der Kontaktfläche sind maßgeblich für die Bodenschonung.

**Döll (1998)** hob die Bedeutung einer gleichmäßigen Druckverteilung in der Kontaktfläche hervor. Dies gelingt am ehesten durch einen der Last angepassten Reifeninnendruck, der für einen gleichmäßigen Spannungsabbau im Boden sorgt.

**Belastungsversuche im Freiland** nutzen den gewachsenen Boden mit der zum Zeitpunkt der Befahrung aktuellen Bodenfeuchte (in wenigen Fällen auch mit Bewässerung/Anfeuchtung). Sie bilden die Verhältnisse vor Ort am besten ab, erschweren aber aufgrund heterogener Bodenverhältnisse die Interpretation. Da die Untersuchungen im Feld sehr zeitaufwendig sind, leiten einige Arbeitsgruppen aus gemessenen Parametern weitere durch Schätzung oder Berechnung ab, um ein umfassenderes Bild von der Auswirkung mechanischer Belastungen auf die Bodenstruktur zu bekommen (Arvidsson et al., 2001; Arvidsson et al., 2002; Keller et al., 2004; van den Akker 2004; Keller & Arvidsson, 2006; Horn et al., 2005).

**Spezielle Belastungsfahrwerke** helfen im Feld, systematisch unterschiedliche Spannungen in den Boden einzuleiten. Dies erfolgt durch Variation von Reifen, Reifeninnendruck und Radlast. Bodendrucke und Veränderungen an der Bodenstruktur werden in unterschiedlichen Tiefen gemessen, wie in den nächsten drei Beispielen dargestellt wird:

**Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode (FAL), 1994:** „Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden durch land-

wirtschaftliche Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodengefüge, Bodenorganismen und biologische Prozesse sowie Pflanzenwachstum und Ertrag“,

Bodendruck und die Veränderung von Porenvolumen (PV) wurden unter variierten Belastungen gemessen. Während in 20 cm Tiefe nach jeder Befahrung eine PV-Abnahme erfolgte, konnte dies in 40 cm Tiefe nicht festgestellt werden, da die Inhomogenitäten des Bodens oft größer waren als die Auswirkung der Belastung. Das Fahren in der Furche beeinflusste die Struktur in 40 cm Tiefe am stärksten.

**Weißbach (2003):** „Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung Boden schonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten“. Es wurde das Zusammenwirken von Reifen und Boden untersucht. Mit Vergrößerung der Kontaktfläche verringern sich Spurtiefe und Bodendruck, und die Zugkraftübertragung steigt. Zu einer Beeinträchtigung der Parameter Dichte, Porenvolumen und Wurzelwachstum kommt es nicht, wenn bei einmaliger Befahrung der Bodendruck auf frisch bearbeitetem Boden < 1 bar und auf abgesetztem Boden < 2 bar bleibt. Die verdichtende Wirkung von Erntemaschinen bleibt hauptsächlich auf den Bearbeitungshorizont beschränkt – wird der Boden allerdings mehrfach mit hohen Lasten überrollt, kann es zu Verdichtungen im Unterboden kommen.

**Horn et al. (2008):** „Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen“.

Die Befahrungen mit unterschiedlicher Belastung erfolgte mit dem Messsystem MOVIS. Nach Pflugbearbeitung konnte durch Befahrung mit 7,5 t und 3,5 bar Reifeninnendruck in 36 bis 40 cm noch ein deutlicher Effekt auf das PV nachgewiesen werden – in 60 cm nicht mehr. Mit zunehmender Überrollhäufigkeit ergab sich eine zunehmende Tiefenwirkung des Bodendrucks. Die konservierende Bodenbearbeitung wies eine deutlich bessere Tragfähigkeit auf. Die aus der Vorbelastung abgeleiteten Belastungsgrenzen zwischen 3,3 und 6,3 t konnten durch anerkannte bodenphysikalische Kennwerte, wie z. B. die Wasserleitfähigkeit nicht bestätigt werden.

**Belastungsversuche mit praxisüblicher Technik** – wie Traktor oder Erntemaschine – kommen den Verhältnissen im Betrieb näher.

**Arvidsson et al. (2001)** untersuchten in Südschweden Unterbodenverdichtungen unter 3- und 6-reihigen Zuckerrübenvollerntern. Wird im Sinne von „worst case“ mit dem KRB 6 (= Köpfrödebunker) 4-fach überrollt, ein Zustand, der am ehesten am Vorgewende vorzufinden ist, reduziert sich die gesättigte Wasserleitfähigkeit in Krumbasis und Unterboden um 90 %. Dieser Einfluss war auf den Ertrag nicht signifikant. Die Tiefe der Verdichtung wurde mit dem Modell SOCOMO (= SOil COmpaction MOdel) berechnet und stimmte mit den gemessenen Werten recht gut über-

ein, weniger dagegen der Einfluss des Reifeninnendruckes auf die Bodenbelastung des Unterbodens (Arvidsson et al., 2002). Weiter zeigen die Ergebnisse, dass die Bodenbelastung im Oberboden nicht einfach eine Funktion des Reifeninnendruckes und die Bodenbelastung im Unterboden nicht nur eine Funktion der Radlast ist, sondern immer eine Funktion der Belastung an der Schnittstelle Reifen-Boden. Die Forschergruppe kommt zu dem Schluss, dass die berechnete Vorbelastung keine brauchbare Bodenbelastungsgrenze ist, um Bodenverdichtungen zu vermeiden (siehe auch Teil I und II „Validierung und Bewertung der Vorbelastung“ in diesem Heft). Auch würden Verdichtungstests (wie z. B. mit dem Ödometer) nicht das Bodenverhalten im Feld widerspiegeln. Demnach besteht dringender Bedarf, das Bodenverhalten im Feld zu untersuchen und mit dem Labortest zu verknüpfen (Keller et al., 2004).

**Botta et al. (2009)** untersuchten den Effekt mehrerer Überrollungen nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung mit dem Ergebnis, dass auch leichte Fahrzeuge unter 30 kN Achslast bei wiederholter Überrollung Unterbodenverdichtungen verursachen konnten. Beim Vergleich von konventioneller Bodenbearbeitung und Direktsaat weist der wendend gelockerte Boden nach einer Befahrung eine stärkere Veränderung von Eindringwiderstand, Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und Spurtiefe auf.

**Brandhuber et al. (2001)** weisen unter selbst fahrenden Gülletankwagen und 6-reih. Köpfrödebunkern auf bindigen Böden keine gravierenden Veränderungen des Unterbodengefüges nach, wenn bei der Bewirtschaftung die Regeln guter fachlicher Praxis eingehalten wurden. In einer anderen Untersuchung (Geischer, 2008) wurde in allen 3 Überrollungsvarianten (1-fach Band, 2-fach Rad, 4-fach Rad) in der oberen Krume eine Zunahme des Eindringwiderstandes nachgewiesen. Die Bodendrucksonden (= Bollingsonden) unter dem Band zeigen in 20 cm, ähnlich wie bei den Radüberrollungen, deutliche Druckspitzen. Diese bauen sich unter dem Band in der Tiefe schneller ab als bei den Radvarianten. In 50 cm Tiefe wurde bei keiner Überrollungsvariante ein Druckanstieg gemessen.

**Duiker (2004)** untersuchte in einem internationalen Projekt den Effekt der Bodenverdichtungen auf den Ertrag. Dieser reduziert sich bei kritischen Ausgangsbedingungen im 1. Jahr um 15 % bei einer Achslast von 10 bis 12 Tonnen. 10 Jahre später liegt der Ertragsrückgang noch bei 3 bis 5 %.

**Gysi (2001)** widmete sich an der Eidgenössischen Forschungsanstalt in der Schweiz den Auswirkungen von sechstreihigen Zuckerrübenrodern auf die Bodenstruktur. Mit 10,7 t Radlast wurde der feuchte/sehr feuchte Boden einfach und vierfach überrollt, und bis in 35 cm Tiefe konnte eine Bodenverdichtung gemessen werden. „Die untersuchten Böden haben also größere Lasten getragen, als bisher vermutet wurde.“

**Schjonning & Rasmussen (1994)** führten in Dänemark Belastungsversuche mit 3-achsigen Transportfahrzeugen durch und nutzten zur Messung der Bodendichte Gammastrahlentechnik und Penetrometer. Auf S- bzw. sL-Böden wurde bei Einfachüberrollung eine leichte Verdichtung ohne Einfluss auf den Ertrag festgestellt. Bei 4-facher Überrollung traten Verdichtungen bis in 60 cm Tiefe mit Ertragseinbußen bei Getreide auf.

**Schäfer-Landefeld et al. (2004)** stellten fest, dass „praxisüblicher Einsatz schwerer Rübenroder (40 t) und Gülleelbstfahrer (30 t) die Gefügeeigenschaften bindiger Böden unterhalb der Ackerkrume nicht gravierend verändert, vorausgesetzt, die Böden wurden vorher nicht tiefengelockert. Die Ergebnisse stützen die Einschätzung, dass Befürchtungen, der Unterboden würde durch den Einsatz heute üblicher schwerer Landmaschinen großflächig geschädigt, nicht zutreffen.“

**Tijink & Spoor (2004)** zeigen, dass der Reifeninnendruck und die Überrollungen die Hauptfaktoren für das Ausmaß der Verdichtung in der Krume sind. Durch Reduzierung des Kontaktflächendrucks sind die Auswirkungen des Fahrverkehrs in der Krume zu reduzieren. Das Fahren in der Furche erhöht das Risiko von Schadverdichtungen im Unterboden. Solange eine Pflugsohle weder Wurzelentwicklung noch Gasaustausch oder Wassertransport behindert, ist die Zerstörung einer solchen Schicht nicht zu empfehlen, da dann eine stärkere Spannungsausbreitung in den Unterboden erfolgt. Empfehlungen für den Reifeninnendruck sind abgeleitet von der Maximalbelastung eines Reifens und führen nach Reifentabelle automatisch zu einer Begrenzung der Radlast in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Bei steigender Radlast vermindert nur eine überproportional steigende Kontaktfläche die Gefährdung des Unterbodens.

#### *Zwischenfazit*

*Die Messungen zum Bodendruck und Eindringwiderstand und die nach geschalteten bodenphysikalischen Untersuchungen bilden die dynamischen Prozesse einer Befahrung ab, wenn auch oft unter „worst case“ Bedingungen. Was bislang fehlt ist die Übertragung dieser Befahrungssituation auf die Praxisflächen unter Berücksichtigung von Parametern wie Spurflächenanteil, Spurflächenverteilung und Überrollhäufigkeit. Weiter fehlt bislang eine Methodik, mit der in vertretbarem Aufwand reproduzierbare „in situ“ Messungen zur aktuellen Bodensetzung beim dynamischen Befahrvorgang durchgeführt werden können, um die Reaktion des Bodens als elastische bzw. plastische Verformung zu bestimmen.*

### 2.3 Entscheidungshilfemodelle

In der Literatur vorgeschlagene Entscheidungshilfemodelle wurden auf unterschiedlichen Grundlagen entwickelt, um dem Landwirt Hinweise zu geben, seinen Maschineneinsatz an die Verdichtungsempfindlichkeit seiner Böden anzupassen. Für die eigenen Arbeiten waren folgende fünf Modelle besonders interessant.

**Chamen et al. (2003)** stellen Vermeidungsstrategien gegen durch Fahrverkehr verursachte Unterbodenverdichtungen vor:

1. Bodendruck verringern durch Reduzieren des Reifeninnendruckes.
2. Aufgebrachte Bodendrücke müssen dicht an der Oberfläche bleiben.
3. Durch Anwendung bestimmter Betriebssysteme müssen Arbeiten bei nassen Bodenbedingungen vermieden werden.
4. Den Fahrverkehr auf bestimmte Fahrgassen beschränken wie bei CTF (= controlled traffic farming) bzw. Gantry.

Die Forschergruppe wählte für ein Befahrbarkeitsmanagement den Ansatz, Radlast, Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck an die Befahrbarkeit des Bodens anzupassen. Dabei wird die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit aus der Vorbelastung und der Bodenfeuchtigkeit abgeschätzt und in vier Klassen von „nicht besonders anfällig“ bis „extrem anfällig“ unterteilt. Diesen Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit werden vier Stufen des mittleren Kontaktflächendrucks zugeordnet und dabei ein „akzeptables Risiko“ von einem „nicht akzeptablen Risiko“ getrennt.

**Diserens & Spiess (2004)** entwickelten für bindige, abgesetzte Böden eine Entscheidungshilfe TASC (= Tyres/Tracks And Soil Compaction) zum Schutz des Bodens vor Schadverdichtungen. Zugrunde liegt das Modell der Vorbelastung als bodeneigene vertikale Druckstabilität. Aus Kontaktfläche, Kontaktflächendruck und Vorbelastung ist in der Schweiz für verschiedene Bodenarten die effektive Lagerungsdichte von 1,7 g/cm<sup>3</sup> als „Grenzwert für schädliche Bodenverdichtung“ kalkuliert worden.

Die Kontaktflächen der Reifen (es liegt ein umfangreicher Datensatz für Reifen vor) und die Bodendrücke wurden berechnet. Der Rechnung liegt eine Befahrung (= 3 Überrollungen) mit statischer Radlast zugrunde. Die Messungen im Rahmen der Entwicklung von TASC haben gezeigt, dass der Oberboden in 42 % der Fälle verdichtet war. Im nahen Unterboden bei 35 cm Tiefe zeigten sich kaum Schadverdichtungen. In 55 cm Tiefe traten bei feuchtem Boden keine ausgesprochen hohen Druckspannungen auf, so dass keine Bodengefährdung festzustellen war.

**Stahl et al. (2005)** haben ein Entscheidungshilfemodell „Bodendruck“ entwickelt, das in einer Excel-Anwendung

die zu erwartenden Bodendrucke der einzelnen Arbeitsgänge berechnet. Als Grundlage diente die Bestimmung der Vorbelastung mit dem Ödometertest nach Bodenbearbeitung mit/ohne Pflug. Weiter wurde unter 33 Maschinenkonstellationen der Bodendruck mit starren Sonden (Stress State Transducer = SST) gemessen. Die Kontaktflächen der Reifen wurden berechnet und die statischen Radlasten geschätzt. Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass konservierend bearbeitete Oberböden stabiler sind. Die rein statische Druckberechnung weicht von den dynamisch gemessenen Werten der Druckverteilung ab. Die höchste mechanische Bodenbeanspruchung wurde bei min. Organ. Düngung, beim Mähdrusch, beim Zuckerrübenroden und beim Erntetransport festgestellt. Bei Radlasten > 4 t sollten überproportional größere Kontaktflächen gewählt werden und bei feuchten Verhältnissen Kontaktflächendrücke von 100 kPa nicht überschritten werden. Ziel des Modells ist, dem Landwirt und Berater Optimierungsmöglichkeiten und Grenzen zum Maschineneinsatz im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes deutlich zu machen.

**Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) (Gullich et al., 2008)** hat mit dem Bodenschutzplaner eine Planungshilfe zur Vorsorge gegen Bodenerosion und -verdichtung zur feldblockbezogenen Abschätzung des Gefährdungspotenzials im Landwirtschaftsbetrieb auf Excel-Basis erarbeitet. Die Autoren weisen den Betrieb auf das Risiko eines Schadzustandes hin mit einer Gefährdungsmaßzahl. Sie ist der Quotient aus Spannung, die in Unterkrume/Unterboden bei Belastung mit der Technik wirkt, und der bestehenden Druckbelastbarkeit (berechnet nach DVWK-Merkblatt 234, 1995). Ziel ist, einen Hinweis auf das Risiko der Befahrung zu geben und die für den jeweiligen Standort unproblematische Technik auszuwählen.

**Rücknagel (2006)** hat für das Betriebsbilanzierungsmodell REPRO zur Abschätzung der Schadverdichtungsgefährdung ein Modul mit den 4 Grundkomponenten „Bodenwassergehalt, Gefügestabilität, Bodendruck und Bewertung“ entwickelt. Aus der Differenz von Bodendruck und Gefügestabilität wird für jede Befahrung ein dimensionsloser Belastungsindex ermittelt. In der Analyse wird die Schadverdichtungsgefährdung bewertet, und aus den Szenariorechnungen lassen sich Empfehlungen zur Vermeidung von Schadverdichtungen im Betrieb ableiten.

#### *Zwischenfazit*

*Selbst wenn bei Bodendruckmessungen dynamische Effekte der Befahrung berücksichtigt werden, wurden bisher Fahrzeugparameter wie Radlasten, Kontaktflächen und Kontaktflächendrücke nur statisch berechnet oder geschätzt. Da starre Bodendrucksonden aufgrund fehlender Anpassung im Boden den Bodendruck eher überschätzen und berechnete Fahrzeugparameter die dynamischen Effekte kaum wiedergeben, können die tatsächlichen Bezie-*

*hungen zwischen Fahrwerk/Reifen und Boden nicht vollständig wiedergegeben werden.*

*Auch in dem Modell nach Chamen et al. (2003) wird die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens aus der Vorbelastung abgeleitet und der mechanischen Belastung gegenübergestellt. Allerdings fehlen dabei wesentliche Fahrzeugparameter, wie Überrollhäufigkeit, Spurflächenanteil und die Auswirkungen auf das Bodengefüge, belegt durch anwendungsorientierte Feldversuche.*

*Die in der Literaturübersicht aufgeführten Versuchsansteller haben die Auswirkungen der Befahrung mit unterschiedlich mechanischer Belastung meist punktuell über einen kurzen Zeitraum gemessen – es fehlen langfristig angelegte Versuchsreihen, die den aktuellen Stand der Landtechnik in dem jeweiligen Bewirtschaftungssystem abbilden. Dennoch liefern alle Versuchsanstellungen wichtige Mosaiksteine, die bei der Betrachtung der Gesamtproblematik Bodenschadverdichtung außerordentlich wichtig sind.*

### **3 Grundlagen für die Entwicklung eines Lösungsansatzes zum vorsorgenden Bodenschutz**

Für die Entwicklung eines praxisorientierten Lösungsansatzes liegen 189 Versuchsreihen seit 1995 vor (Brunotte et al., 2000; Brunotte, 2007; Brunotte et al., 2007b,c; Brunotte et al., 2008; Sommer et al., 2001). Die Auswirkung der Befahrung auf die Bodenstruktur wurde in Krume, Krumbasis und nahem Unterboden untersucht. Bei den Feldversuchen handelt es sich zu 95 % um schwach- bis mitteltonige Schluffböden (Ut 2 bis 3) aus Löss. Der Jahresniederschlag liegt zwischen 750 und 800 mm/a und die Bodenzahlen bewegen sich zwischen 75 und 90 Punkten.

Aus den vorliegenden Versuchsreihen wurden die folgenden vier Leitlinien abgeleitet:

1. die Stuserhebungen zum Bodengefügezustand bei heutiger Landbewirtschaftung als Grundlage zu nutzen und davon die Problematik, Brisanz und Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Krume und Unterboden abzuleiten
2. heute typisch eingesetzte Praxismaschinen für gezielte Befahrversuche zu nutzen: praktikable „in situ“ Messungen durchzuführen und die Auswirkungen der dynamischen Befahrung mit den Ergebnissen bodenphysikalischer und pflanzenbaulicher Untersuchungen zu belegen
3. die Ergebnisse von Stuserhebungen und Befahrversuchen zur Ableitung eines praktikablen Lösungsansatzes heranzuziehen
4. daraus im Detail abgeleitete Handlungsempfehlungen für eine bodenschutzorientierte Bewirtschaftung zu nutzen, einmal als Planungsinstrument für Maschineninvestitionen und -einsatz und darüber hinaus für die Erfolgskontrolle auf Betriebsebene

Daraus wurden zwei Bausteine für den anwendungsorientierten Lösungsansatz abgeleitet:

- Erarbeitung einer Entscheidungsmatrix für den standortabhängigen Maschineneinsatz
- Entwicklung eines Multisensorsystems als Erfolgskontrolle

3.1 Erarbeitung einer Entscheidungsmatrix für den standortabhängigen Maschineneinsatz

Die Entscheidungsmatrix dient dem Landwirt, Maschinenring und Lohnunternehmer als Planungsinstrument bei Investitionen von Maschinen und deren Einsatz. Es handelt sich hier um ein Expertensystem, bei dem wissenschaftliche Erkenntnisse zur Auswirkung des Maschineneinsatzes auf die Bodenstruktur mit langjährigen Praxiserfahrungen des Landwirts verknüpft werden.

Zur Entwicklung der Entscheidungsmatrix wird von der Regionsebene mit ihren Stuserhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) übergegangen auf die Betriebsebene, da die Anpassung der Maschinenausstattung an den jeweiligen Standort nur betriebsspezifisch erfolgen kann.

Die seit 1995 durchgeführten eigenen Befahrungsversuche mit Einzelradmessvorrichtung, Traktoren, Ernte- und Transportmaschinen liefern die Grundlage für die Bewertung. Als Entscheidungsmatrix dient ein Quadratraster mit 5 Stufen auf der X-Achse und 5 Stufen auf der Y-Achse (Abbildung 2). Auf der X-Achse ist die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit abgetragen.

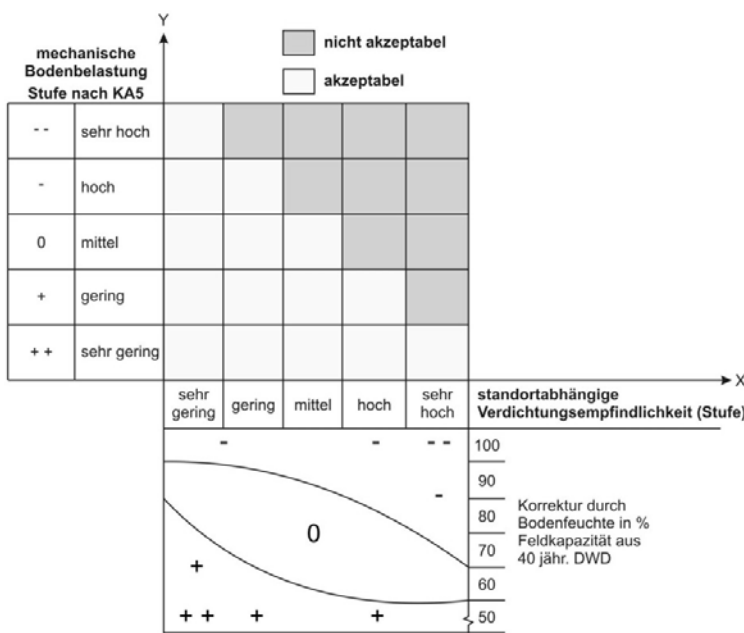


Abbildung 2: Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit und mechanischer Bodenbelastung

Zur Einstufung der Böden arbeiten eine Reihe von Arbeitsgruppen wie LBEG Hannover, Müller & Schäfer mit NIBIS (Strobel, 1989; Müller, 2004; Lebert & Schäfer, 2005; Schäfer, 2008); Universität Kiel, Horn mit Vorbelastungskonzept (Horn et al., 2009); Tänikon Schweiz, Diserens mit TASC (Diserens & Steinmann, 2002; Diserens & Spiess, 2004); Universität Halle, Christen & Rücknagel mit REPRO (Rücknagel, 2006); Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena, Paul mit KUL (Paul, 1999); Chamen, Silsoe (Chamen et al., 2003); neue Arbeiten von Lebert (2010). Die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit wird vornehmlich durch Schätzung der Vorbelastung hergeleitet. Da Teil I und II in diesem Heft die geringe Reproduzierbarkeit dieses Ansatzes aufzeigen, ist zukünftig weiter an einer Verbesserung der Methodik zur Bestimmung der standortabhängigen (Boden, Klima) Verdichtungsempfindlichkeit zu arbeiten.

Eine praktikable Lösung für den Landwirt wäre zur Zeit die Einstufung seiner Schläge nach den jeweiligen Bodensubstraten unter Berücksichtigung regionaler Niederschlagsdaten. So ist z. B. ein Betrieb in der Vorharzregion Südniedersachsens mit tonigen Schluffen und schluffigen Tonen bei 800 mm/a Niederschlag eher als mittel bis hoch, während Lehmschluffe und Schlufftone mit 450 mm/a Niederschlag in Bernburg/Sachsen-Anhalt eher als gering bis mittel verdichtungsempfindlich einzustufen sind.

Die Bestimmung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit hat in der Planungsphase großen Einfluss auf die Investition einer Maschine, weil bei der Größe (= Arbeitsbreite, Motorleistung) die Auslastung (= Kampagneleistung) zugrunde gelegt wird. Stehen aufgrund der Witterung weniger Befahrbarkeitstage zur Verfügung, ist bei einer bestimmten Fläche die Schlagkraft zu erhöhen oder bei einer bestimmten Maschinengröße die Fläche zu reduzieren. In Regionen mit weniger Niederschlägen, fallen in der Erntezeit aufgrund besserer Auslastungsgrade geringere Kosten/ha an.

**Auf der Y-Achse ist die mechanische Bodenbelastung durch Maschineneinsatz klassifiziert. Der Gedanke dabei ist, die Maschinenausstattung nach der Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes auszurichten! Und nicht den Boden auf die mechanische Belastung der Maschinen reagieren zu lassen. Nur diese Zuordnung entspricht der Zielrichtung des vorgeschlagenen Bodenschutzes.**

Die Einstufung der Maschinen in fünf Klassen mechanischer Bodenbelastung erfolgte auf Grundlage langjähriger praktischer Befahrungsversuche. Als technische Belastungsparameter wurden dabei erhoben:



- Radlast (RL) in t (gemessen; bei Ernte- und Transportmaschinen mit vollem Bunker)
- Kontaktfläche (KF) in cm<sup>2</sup> (gemessen)
- Mittlerer Kontaktflächendruck in kPa (aus RL und KF berechnet)
- Reifeninnendruck (Pi) in bar (gemessen)
- Spurflächenanteil in % (gemessen)
- Überrollhäufigkeit in n (gemessen)
- Schlaglänge in m (gemessen)
- Bodenbearbeitung (berücksichtigt)

Die Messungen bei maximaler Last stellen den „worst case“ dar, der bei Ernte- und Transportmaschinen aber nur wenige Meter auf der Kernproduktionsfläche und am Vorgehende zutrifft. Auf dem Rest der Fläche ist immer von einer geringeren mechanischen Belastung auszugehen. Es gibt andere Arbeiten, wie von Schreiber (2009), die einen mittleren Beladungszustand und damit eine mittleren Belastung berücksichtigen.

Messungen zur Bodensetzung, zur aktuellen Feuchte, zur Porenverteilung, zur Luftkapazität (LK) und zur gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) lieferten die Grundlage, die Veränderung der Bodenstruktur durch das Befahren zu klassifizieren. Die Maschinen wurden in ihrer mechanischen Belastung von „sehr hoch bis sehr gering“ eingestuft, reziprok bewertet anhand der bodenphysikalischen Kennwerte von „sehr gering bis sehr hoch“ (aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5, Ad-hoc-AG Boden, 2005). Dabei wird eine Maschine, die durch Befahrung eine „geringe Wasserleitfähigkeit“ erzeugt, mit „hohe mechanischen Belastung“ eingestuft.

Die Kontrolle war immer der unbefahrene Ausgangszustand des Bodens, z. B. mit einer Wasserleitfähigkeit von 50 cm/d in der Stufe „mittel“. Erfolgt durch die Befahrung mit einer Technikvariante eine Minderung auf z. B. 8 cm/d, so liegt nur noch die Stufe „gering“ vor (siehe auch Abbildungen 6/7). Die Verknüpfung aller oben genannten Kennwerte ermöglicht eine relativ präzise Einstufung z. B. des Verfahrens „Silomaisern“ und auch anderer Verfahrensketten. Hinter der Bewertung der Maschinen steht ein „Expertensystem“, das sich auf eine Reihe von untersuchten Parametern zur Technik, zur Bodenphysik und zum Pflanzenbau stützt und nach einer Plausibilitätsanalyse die Einstufung der Maschinen nach „mechanischer Bodenbelastung“ bzw. „Beitrag zum Boden schonenden Befahren“ vornimmt.

### 3.2 Entwicklung eines Multisensorsystems zur Erfolgskontrolle der Befahrung

Um dynamische Befahrungseffekte abzubilden, sind „in situ“ Messungen erforderlich. Lebert (2010) und Stahl et al. (2005) heben bei der Messung der Bodendrucke starre Sonden hervor, da sie gerichtete Drücke messen können.

In den eigenen Untersuchungen wurde zunächst die Bodendruckmessung mit Schlauchsonden (= hydraulische Sensoren) ausgewählt, die eingebaut werden können ohne das Bodengefüge nennenswert zu stören (Nolting et al., 2006; Brunotte et al., 2007b, c). In 40 cm Tiefe ist allein der vertikale Druck maßgeblich, so dass auf eine Messung der gerichteten Spannungen mit starren Sonden verzichtet werden kann (Ausnahme: Messungen unter dem Furchenrad beim Pflügen). Starre Sonden führen beim Einbau zu erheblichen Störungen des Bodenprofils, die den Informationsgewinn bezüglich der Richtung des Bodendruckes fragwürdig erscheinen lassen. Außerdem messen sie eher zu hohe Werte, da sie sich bei der Bodensetzung nicht mitbewegen (Bolling, 1987; Diserens & Steinmann, 2002; Weißbach, 2003).

Die eingesetzten Bolling-Sonden zur Messung des Bodendruckes geben jedoch nur einen indirekten Hinweis auf die im Boden unter Last auftretenden Verformungsprozesse, da die durch den Bodendruck induzierten Bewegungen im Boden nicht erfasst werden. Der Nachweis geringfügiger Veränderungen der Bodenstruktur (z. B. durch Scherung) beim Befahren ist hiermit nicht möglich.

Die Verformung des Bodens unter Last wird an der Bodenoberfläche durch Ausbildung einer Fahrspur sichtbar. Aus dem Bestreben, die Fortsetzung dieser vertikalen Bodenbewegung von der Oberfläche in die Tiefe des Bodens zu verfolgen, entstand die grundlegende Idee zur „in situ“ Messung der Bodensetzung in unterschiedlichen Tiefen (Danfors, 1974; Arvidsson et al., 2001). Bei der praktischen Umsetzung dieser Idee wurden verschiedene Wege beschritten. In einem Ansatz wurde die vertikale Bewegung von Platten oder anderen in den Boden eingebrachten Probekörpern über Seilzüge auf elektromechanische Positionssensoren übertragen und gemessen (Kühner, 1997; Voßbrink, 2005).

Wegen des großen Aufwandes beim Einrichten derartiger Messstellen und der Anfälligkeit der mechanischen Komponenten wurde nach praktikableren Lösungen gesucht. So wurde am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des vTI nach dem Prinzip der Schlauchwaage ein hydrostatisches Niveau-Messsystem entwickelt, bei dem ein Schlauchende mit einem Druckaufnehmer als Referenzniveau fixiert und das offene Ende mit dem Meniskus der Wassersäule zur Messung des Höhenunterschiedes genutzt wird (Nolting et al., 2006). Es stellt den ersten Baustein des **Multisensorsystems** dar (Abbildung 3). In der technischen Realisierung mündet das offene Schlauchende in einen Vorrats- bzw. Niveaugefäß. Mit einem Bauwerk verbunden, erfolgt so eine Setzungsüberwachung (Gertloff, 1994). Ein derartiges hydrostatisches Messsystem wurde in Kombination mit einer in das Vorratsgefäß eingelassenen Kraftmesszelle zur Messung des vertikalen Bodendruckes auch schon bei Feldversuchen zur Bodensetzung

(Trautner, 2003; Avidsson & Andersson, 1997) eingesetzt. Ähnlich wie beim Einbau starrer Drucksonden wird auch hier beim Installieren des Niveaugefäßes unter der Fahrspur der Boden empfindlich gestört. Vor diesem Hintergrund hat es eine entscheidende eigene Weiterentwicklung gegeben.

Das Problem des offenen Schlauchendes (z. B. Wassersäule reißt ab bzw. Schlauch läuft leer) wurde durch das „Schlauch-in-Schlauch“ System gelöst, bei dem sich der offene, mit Wasser gefüllte Schlauch in einem am Ende verschlossenen Hüllschlauch befindet. Ein Differenzdruckaufnehmer misst die Druckdifferenz zwischen innerem und äußerem Schlauch. So entsteht ein geschlossenes, vom Luftdruck unabhängiges System, aus dem trotz hängender Wassersäule kein Wasser entweichen kann. Die Höhenunterschiede können mit einer Auflösung von 0,1 mm gemessen werden. Die technische Umsetzung trägt den besonderen Anforderungen bei der Setzungsmessung im Boden Rechnung. Kurze Auf- und Abbauzeiten schaffen die Möglichkeit, bei unveränderten Bodenbedingungen eine Reihe von reproduzierbaren Messungen in unterschiedlichen Tiefen durchzuführen. Mit Hilfe einer Schablone werden 4 Messsonden je Tiefe (z. B. in 10, 20, 30, 40 cm) in den Boden eingeführt. Die Schlauchenden befinden sich bei der Befahrung mittig unter dem Reifen bzw. dem Bandlaufwerk. Die Setzungskurven von Einfach- und Mehrfachüberrollungen werden elektronisch aufgezeichnet und liegen für die weitere Versuchsdurchführung gleich vor.

Anhand der Bodensetzung kann natürlich keine direkte Aussage über den aktuellen Zustand der Funktionalität des Gefüges getroffen werden, aber eine Prognose, ob durch die Befahrung mit einer Verschlechterung der Ausgangssituation zu rechnen ist.

Um zu überprüfen, ob es durch die Befahrung des Ackers mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen zu einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen (im Sinne des BBodSchG § 17) gekommen ist, wurden alle relevanten technischen Parameter (Reifen, Radlast, Kontaktfläche, Reifeninnendruck) erfasst und die Setzungsmessungen durch Untersuchung bodenphysikalischer Kennwerte (aktuelle Feuchte, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, Gesamtporenvolumen, Porengrößenverteilung, Trockenrohddichte, Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit) ergänzt. Die Feldversuche mit der Bodenart Ut 2 bis 3 (Löss) erfolgte im Zeitraum von 1995 bis 2010 in den Tiefen: Krume (20 cm), Krumbasis (je nach Bewirtschaftung bei ca. 30 cm) und naher Unterboden (40 cm Tiefe). Die Ergebnisse aus diesen 3 Tiefen sind auch Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis.

Den zweiten Baustein des **Multisensorsystems** stellen zwei Ultraschallsensoren an der Maschine dar (Abbildung 3). Der Ultraschallsensor unter der Maschinenachse ermöglicht eine online Spurtiefenmessung. Eine Verknüpfung mit der Setzung erfolgt, indem die vertikale Fortbewegung der Spurtiefe mit Hilfe der Setzungsmessung erfasst wird. Zeigt diese eine bleibende Bodensetzung (= plastische Verformung) an, müssen Fahrzeugparameter an den kritischen Bodenzustand angepasst werden. Hier kommt der zweite Ultraschallsensor in der Felge ins Spiel, mit dessen Hilfe der Reifeninnendruck an die aktuelle Radlast angepasst werden kann. Bisher konnte keine optimale Reifeninnendruckanpassung erfolgen, da keine Kenntnis über die dynamische Radlast, insbesondere von Erntemaschinen mit Bunker, vorlag. Die Reifenhersteller weisen in den Reifentabellen eine maximale Belastung des Reifens

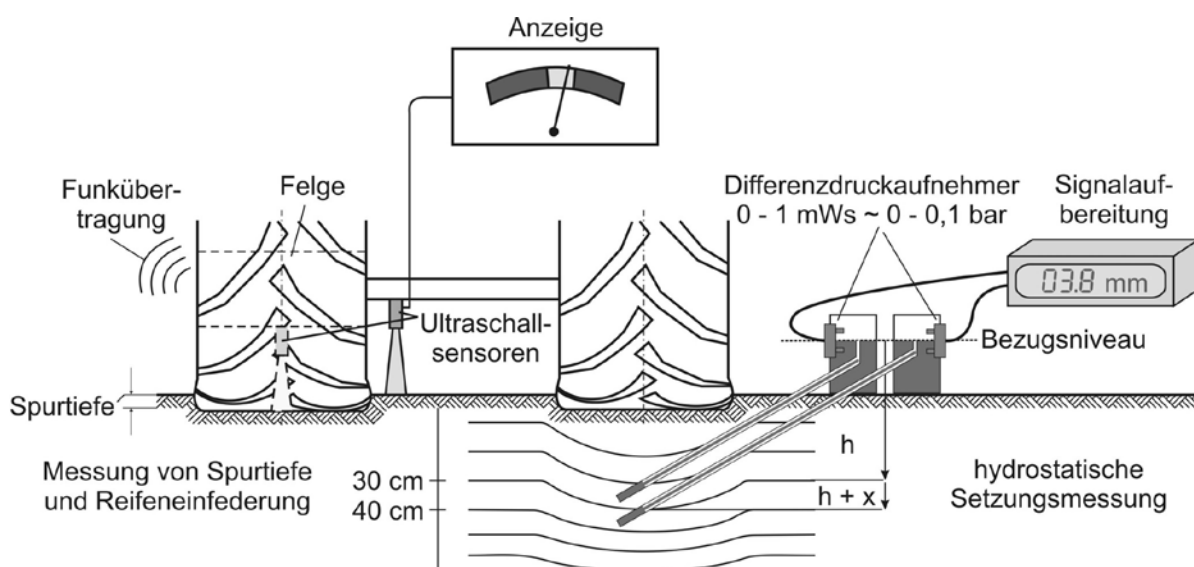


Abbildung 3:  
hydrostatische Setzungsmessung und Multisensorsystem an landwirtschaftlichen Maschinen

bei vorgegebenem Reifeninnendruck und entsprechender Fahrgeschwindigkeit aus. Zugrunde liegt eine maximal zulässige Reifeneinfederung, bei der es zu keiner Schädigung des Reifens kommt. Der Ultraschallsensor zeigt durch Funkübertragung den aktuellen Einfederungswert in der Kabine an. Die Aufgabe einer zukünftigen Regelung besteht also darin, bei sich verändernder dynamischer Radlast den Reifeninnendruck so anzupassen, dass immer die maximal zulässige Einfederung realisiert wird und damit über die maximal mögliche Kontaktfläche der geringst mögliche Bodendruck auftritt.

Am Beispiel der Silomaisernte erfolgt in Kapitel 4 eine Bewertung dieses Verfahrens hinsichtlich Bodenschonung anhand technischer, bodenphysikalischer und pflanzenbaulicher Parameter.

#### 4 Validierung des Lösungsansatzes (Entscheidungsmatrix, Multisensorsystem) zum vorsorgenden Bodenschutz am Beispiel der Silomaisernte

##### 4.1 Bewertung der mechanischen Belastung durch Maschinen

Am Beispiel der **Silomaisernte** wird die Bewertung der mechanischen Bodenbelastung exemplarisch vorgenommen. Tabelle 1 zeigt einige wichtige technische Daten von eingesetzten Maschinen in der Zuckerrüben- und Maisernte. Die technischen Daten aus der Rübenernte sollen lediglich die Relationen zur Silomaisernte aufzeigen.

Die Silomaisernte erfolgt weitestgehend mit selbstfahrenden Häckslern, deren Gewicht sich während des Erntevorganges nicht verändert. Der Reifeninnendruck wird einmal an die konstante Feldarbeitsgeschwindigkeit angepasst und beträgt im vorliegenden Beispiel 1 bar. Das Erntegut wird von parallel fahrenden Transportfahrzeugen, Traktor mit Silowagen (hier mit Tandemachse) aufgenommen und zum Silo transportiert. Durch den kombinierten Transport auf Feld und Straße muss sich der Reifeninnendruck bei einer Radlast von 5 bis 6 t nach der hohen Straßengeschwindigkeit ausrichten und beträgt 2 bis 3 bar. Die hier skizzierte Verfahrenskette zur Silomaisernte wurde ausgewählt, da sie heute am häufigsten vorkommt.

Die absolute Höhe der mechanischen Belastung in Tonnen Radlast und der Reifeninnendruck spielen eine große Rolle für die Beanspruchung der Bodenstruktur. Bei den skizzierten Befahrungsvorgängen wurde mit vollem Bunker immer die maximale Last erzeugt. Diese gilt nur für die letzten 10 bis 20 % der Befüllstrecke und für das Vorgehen zu. Der Großteil der Fläche (80 bis 90 %) werden weniger stark mechanisch beansprucht. Insgesamt ist also der befahrene Flächenanteil, die Verteilung der Belastung über die Fläche und die Anzahl Überrollungen von entscheidender Bedeutung und beschreibt die Gesamtbelastung der Fläche. In den Abbildungen 4 und 5 sind die **Überrollhäufigkeiten und Spurflächenanteile** bei der Silomaisernte „Feldhäcksler + Häckselwagen zum Silo“, klassiert nach Reifeninnendruckklassen, aufgeführt – nur diese Einteilung ist sinnvoll, da sich der Reifeninnendruck-

Tabelle 1:

Technische Daten von Traktoren, Ernte- und Transportmaschinen bei Zuckerrüben- und Maisernte

Gerät	„Reifenposition“	Bezeichnung	„Radlast [t] (Bunker voll)“	Reifeninnendruck [bar]		
				zykl., 10 km/h	50 km/h	Schräghang
Rübenroder (6-reih. SF*) mit Bandlaufwerk	vorne	89 x 200 cm	14			
	hinten	900/65 R32	10	1,7		
Rübenroder (6-reih. SF*) 2-achsig	vorne	800/65 R32	10,5	2,3		2,5
	hinten	1050/50 R32	12,0	2,5		2,7
Traktor 130 kW	vorne	540/65 R34	2,45	> 1,0	1,3	
	hinten	650/65 R42	2,95	< 1,0	1,0	
Muldenkipper	1 Achse	710/50 R30.5	8,25	2	3,8	2,2
Maishäcksler 4,5 m Schnittbreite	vorne	800/65 R32	6,05	1,1	2,1	
	hinten	700/50-26.5	1,9	< 1,0	< 1,0	
Traktor 175 kW	vorne	600/65 R34	2,25	< 1,0	1,0	
	hinten	650/85 R38	4,3	1,0	1,0	
Häckselwagen 50 m <sup>3</sup>	Tandem	700/50 R26.5	5,5	1	2,3	

\* SF = Selbstfahrer

normalerweise auf dem Acker nicht ändert. Radlasten dagegen können nur schwer in Klassen eingeteilt werden, da sie sich beim Erntevorgang durch die Bunkerfüllung ändern. Der Häcksler und der Traktor mit zwei Anhängern kommen auf acht Überrollungen, wenn sie in einer Spur fahren. Die Transportanhänger haben in dieser Kette mit

3 bar die höchsten Reifeninnendrucke. An der X-Achse ist abzulesen, dass die Fahrzeuge 50 % der Fläche (graue Bereich ohne Säulen) überrollen.

Diese beiden Abbildungen verdeutlichen, wie beim Übergang von der Standardbereifung zu Breitreifen die Reifeninnendrucke von maximal 3 bar auf 1,4 bar (Tridem-

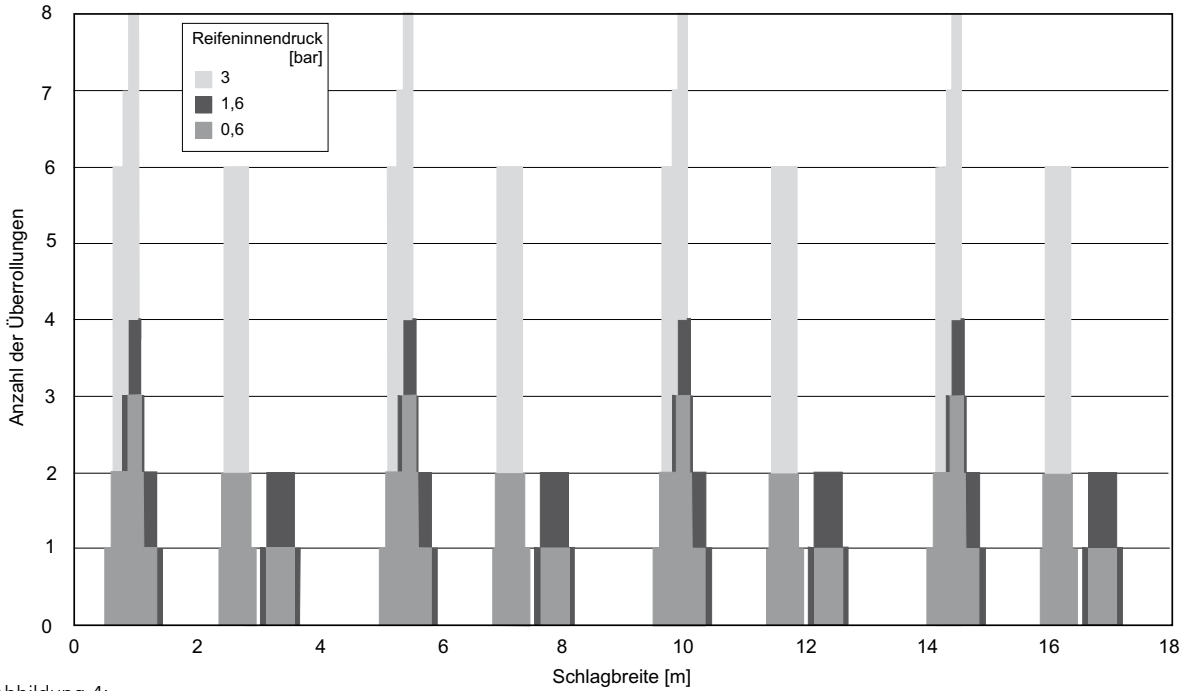


Abbildung 4: Anzahl der Überrollungen und Verteilung der Fahrspuren bei der Silomaisernte (Bsp. Gliederzug, Standardbereifung), Brunotte & Fröba, 2007a.

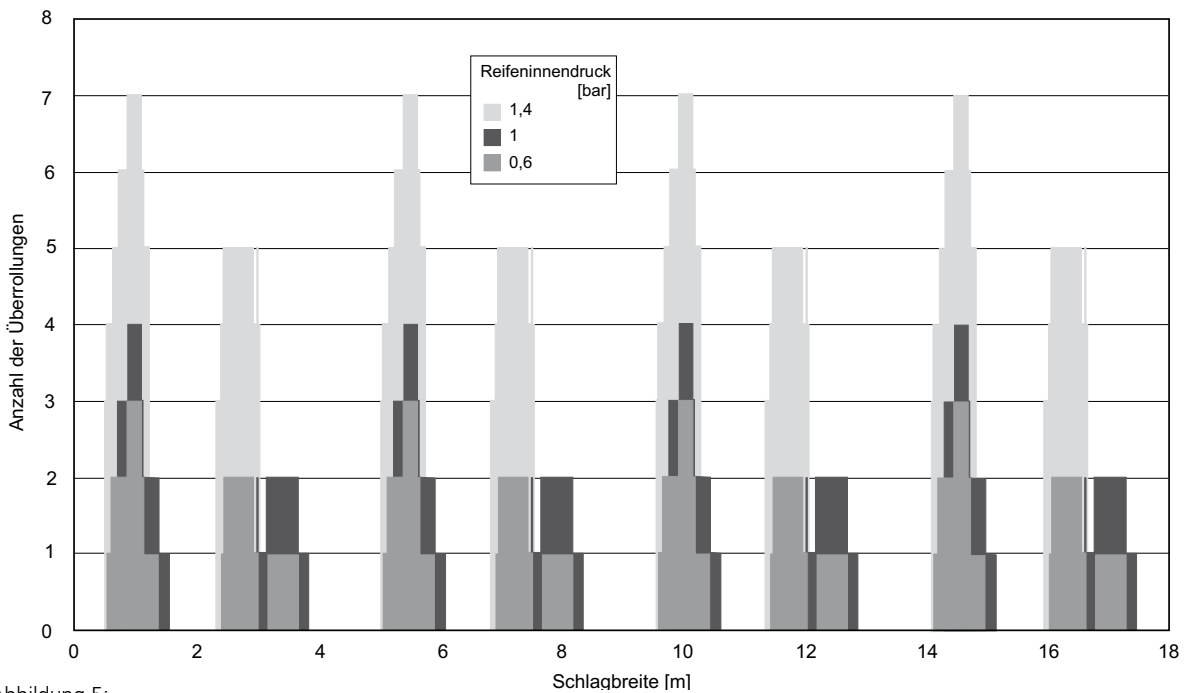


Abbildung 5: Anzahl der Überrollungen und Verteilung der Fahrspuren über die Fläche bei der Silomaisernte (Bsp. Dridemanhänger. Breitreifen), Brunotte & Fröba, 2007a.

Silowagen) reduziert werden, der Spurfleichenanteil (= überfahrene Fläche) aber aufgrund der breiteren Bereifung von 50 auf 62 % zunimmt (siehe auch Zapf, 1997).

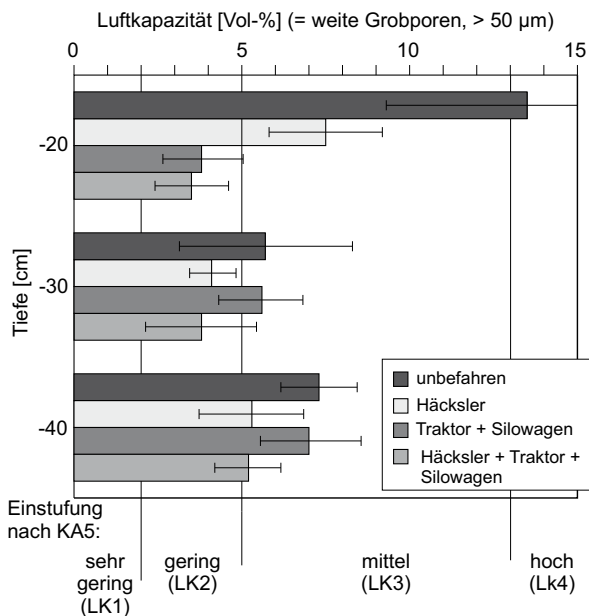


Abbildung 6: Änderung der Luftkapazität durch Befahrung bei der Silomaisernnte (Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

Bei den bodenphysikalischen Untersuchungen wurden Feldhäcksler und Traktor mit Silowagen sowohl allein

als auch aufeinander folgend über die Messstellen gefahren (Bodenart Ut 2 bis 3, Löss, 750 bis 800 mm Niederschlag/a), um die Situation abzubilden, wenn das parallel fahrende Transportfahrzeug in der zuvor angelegten Spur des Häckslers fährt. Für die Bewertung der mechanischen Belastung werden zunächst zwei wichtige Laborparameter aus dem Indikatorsystem nach Lebert et al, 2004 herausgegriffen: **Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit**. Der Feldgefügeanspruch wird später Rechnung getragen, wenn es um die Ertragsentwicklung der Folgekultur geht (Abbildung 11).

Die Luftkapazität (Abbildung 6) und die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Abbildung 7) reagieren *in der Krume* (20 cm) auf die Befahrung in Abhängigkeit von der Belastungshöhe – hoher Kontaktflächendruck in Verbindung mit hohem Reifeninnendruck (wie beim Transportfahrzeug) senkt die Luftkapazität und die Wasserleitfähigkeit stärker als der Häcksler alleine (= LK Stufe „mittel“ nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)).

Fahren beide Maschinen in einer Spur, verringern sich die Werte durch die Mehrfachüberrollungen um ein weiteres – bei der Wasserleitfähigkeit stärker als bei der Luftkapazität. Die *Krumenbasis* (30 cm) zeigt insgesamt eine dichtere Lagerung, ist aber immer noch durchlässig für Luft und Wasser. Die unterschiedlichen mechanischen Spannungen, durch Erntemaschine bzw. Transportfahrzeug hervorgerufen, sind hier nicht nachzuweisen, es sei denn, die Räder folgen alle einer Spur. Im *nahen Unterboden* (40 cm) sind die Kennwerte wieder leicht erhöht – die Luftkapazität lässt keine

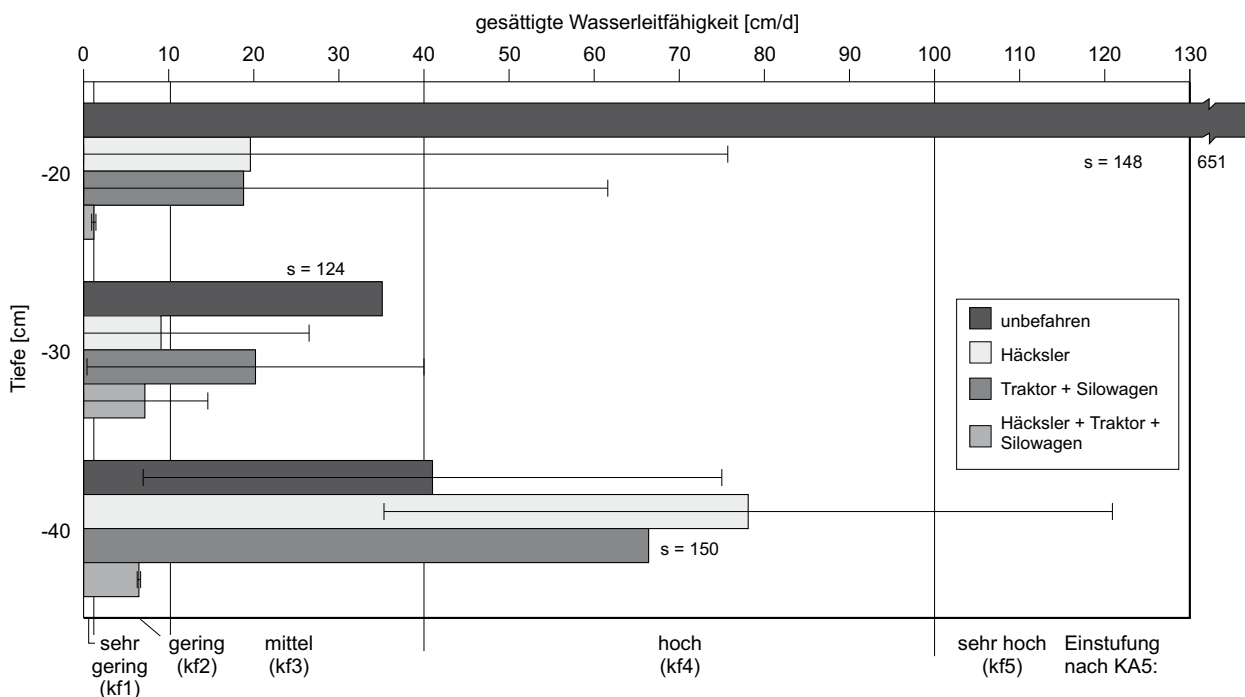


Abbildung 7: Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernnte (Ut 2-3, Löss, Oktober 2007)

Unterschiede zwischen den Belastungsvarianten erkennen. Bei der Wasserleitfähigkeit ist der Einfluss der Mehrfachüberrollung deutlich zu erkennen. Bei der Interpretation der Daten spielt die Bodenfeuchte eine große Rolle, die nach 120 mm Niederschlag gemäß KA5 als Stufe „feu 4“ für alle Horizonte anzusprechen war. Dabei sind durch den hohen Porenwasserdruck und die mittlere Überrollgeschwindigkeit von 6 km/h die Auswirkungen der mechanischen Belastung auf die Bodenstrukturgering ausgefallen.

Die Befahrung von Häcksler und Silowagen in einer Spur haben bei Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit eine Minderung in die Stufe „gering“ verursacht – reziprok bedeutet dies eine mechanische Belastung von „hoch“. Werden die beiden Fahrzeuge in getrennten Spuren gefahren und damit die Überrollhäufigkeit gemindert, liegen die Kennwerte in der Stufe „mittel“, was eine „mittlere“ mechanische Belastung bedeutet (Abbildungen 6/7 und 8).

Dieses Beispiel zur Silomaisernnte mit den entsprechenden Detailuntersuchungen ist Bestandteil einer Vielzahl von Messreihen (GPV n = 189, LK n = 150, kf n = 80) zur mechanischen Belastung in Horizonten. Wird bei den bodenphysikalischen Parametern der durch die Befahrung verursachte Wechsel von Stufen nach der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) über 15 Jahre betrachtet, so ergibt sich für die Horizonte der Versuchsstandorte (Ut 2 bis 3, Löss; 750 bis 800 mm Niederschlag (NS)/a) folgendes Bild (Tabelle 2).

Demnach reagiert die bearbeitete Krume am stärksten auf die Befahrung, insbesondere mit dem Parameter „gesättigte Wasserleitfähigkeit“. Die Krumbasis ist grundsätzlich fester und homogener und reagiert infolgedessen auch am wenigsten, aber auch hier nimmt kf am häufigsten ab. Der Unterboden reagiert beim GPV/LK leicht auf die Spannungen, bei kf am häufigsten. Die Wasserleitfähigkeit ist also der sensibelste Parameter, der allerdings wegen oft hoher Streuung nur mit einer großen Anzahl Proben zu bestimmen ist.

**Zwischenfazit**

Wird für die Beurteilung der Verfahrenskette „Silomaisernnte“ die Wirkung der Befahrung auf die Kennwerte Gesamtporenvolumen, Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) auf die Y-Achse der Entscheidungsmatrix übertragen, so ergibt sich folgende Einstufung der möglichen Techniklösungen (Abbildung 8).

Tabelle 2:

Veränderung bodenphysikalischer Kennwerte durch Befahrung nach den Stufen der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Krume		
	Verringerung [%]	keine Veränderung [%]
GPV	25	72
LK	43	48
kf	83	8
Krumenbasis		
	„Verringerung [%]“	„keine Veränderung [%]“
GPV	0	100
LK	21	68
kf	57	43
naher Unterboden		
	„Verringerung [%]“	„keine Veränderung [%]“
GPV	14	86
LK	17	67
kf	43	46

Wechsel der Klassen nach KA5

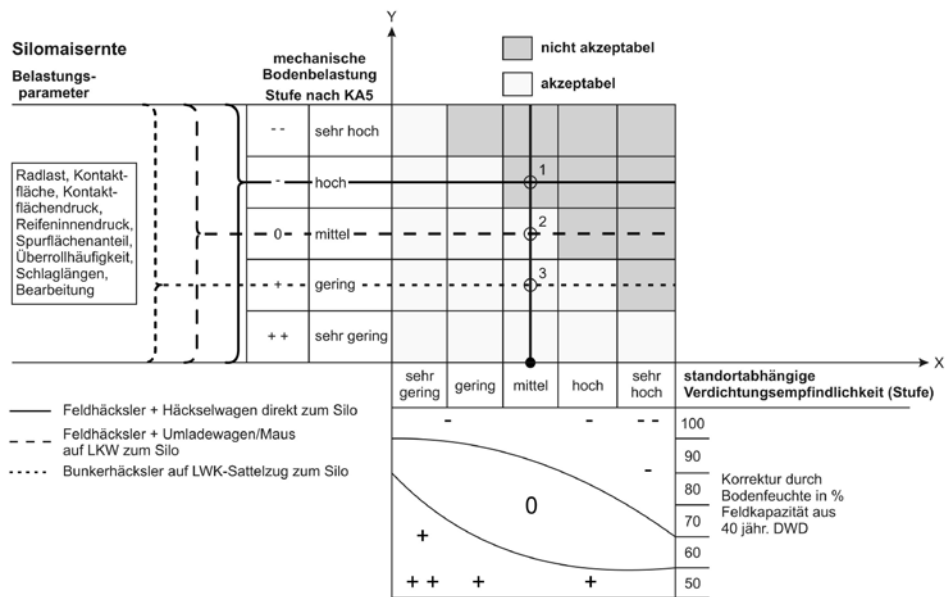


Abbildung 8:

Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X) und mechanischer Bodenbelastung (Y) am Beispiel der Silomaisernnte

Der zu betrachtende Beispielstandort, ein Lehmschluff mit 600 mm/a Niederschlag und 70 bis 80 % Feldkapazität während der Erntezeit, ist in seiner Verdichtungsempfindlichkeit in der Stufe „mittel“ einzuordnen (= schwarze senkrechte Gerade). Es ist jetzt zu prüfen, ob der Schnittpunkt mit den **Technikvarianten im „akzeptablen“ bzw. „nicht akzeptablen“ Bereich** liegt. Das Ergebnis sollte im ersten Schritt direkten Einfluss auf die Investitionen von Maschinen und im zweiten Schritt auf den Einsatz zur Ernte haben.

Insgesamt ist das herkömmliche Verfahren zur Silomais-ernte, bei der das parallel fahrende Transportfahrzeug der Spur des Häckslers folgt, aufgrund von Reifeninnendruck und Überrollhäufigkeit als „hoch“ in der mechanischen Belastung einzustufen. Dies ergibt sich aus der Luftkapazität und der Wasserleitfähigkeit, die nach der Befahrung mit „gering“ eingestuft sind (= reziprok von „hoch“, siehe Abbildungen 6/7). Das liegt vor allem in dem kombinierten Feld-Straßentransport begründet, weil sich der Reifeninnendruck nach der hohen Geschwindigkeit auf der Straße richtet. *Der Schnittpunkt (1)* der durchgezogenen horizontalen Maschinengeraden mit der vertikalen Standortgeraden (Abbildung 8) liegt im „nicht akzeptablen“ Bereich. Infolgedessen kann die Verfahrenskette im Mittel der Fälle kaum bodenschonend auf dem skizzierten Standort eingesetzt werden.

Eine Verschiebung der mechanischen Belastung aus der Stufe „hoch nach mittel“ ist nur zu erreichen, wenn es zu einer Trennung von Feld- und Straßentransport kommt und der Silomais feldseitig mit dem herkömmlichen Silotandemwagen mit angepasstem Reifeninnendruck in versetzten Spuren transportiert wird. Das Überladen auf LKWs kann mit stationärer Verladestation oder einer Maus aus der Rübenlogistik erfolgen. Übernehmen spezielle Umladewagen den Feldtransport, kann durch breitere Reifen der Innendruck noch weiter gemindert werden und das Verladen erfolgt direkt auf LKWs.

Hier liegen die bodenphysikalischen Kennwerte Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit nach einer Befahrung in der Stufe „mittel“ (Abbildungen 6/7), was eine „mittlere“ mechanische Belastung bedeutet (= gestrichelte Klammer/Gerade). *Der Schnittpunkt (2)* mit der Standortgeraden erfolgt im „akzeptablen“ Bereich (Abbildung 8), so dass durch die Veränderung der Verfahrenskette jetzt ein Einsatz bei der skizzierten standortspezifischen Verdichtungsempfindlichkeit möglich ist.

Eine weitere Verbesserung der Bodenschonung wird mit einem Bunkerhäcksler erzielt, der am Feldrand direkt auf LKW-Sattelzüge überlädt. Der dann erreichte *Schnittpunkt (3)* aus gepunkteter Geraden mit der vertikalen Standortgeraden liegt im „akzeptablen“ Bereich und würde einen Einsatz auch bei zunehmender Feuchte (FK 80 bis 90 %) noch zulassen. Durch die Hundeganglenkung ist bei groß-

er Arbeitsbreite eine Einfachüberrollung mit Reifeninnendrücker um 1 bar möglich. Voraussetzung ist, dass die Schlaglänge an die Bunkerkapazität angepasst wird (Brunotte & Fröba, 2007a; Brunotte et al., 2011; KTBL, 2011).

Da es sich bei der **Entscheidungsmatrix um ein expertengestütztes Planungsinstrument** handelt, erfolgt damit eine grobe Voreinschätzung der Maschinen. Die tatsächlichen Bedingungen der Befahrung auf die Bodenstruktur festzustellen, ergeben sich aus der Erfolgskontrolle.

Die positiven Auswirkungen der Trennung vom Feld – Straßentransport auf die Bodenstruktur durch eine verminderte Überrollhäufigkeit wurde wiederholt nachgewiesen (Schjonning & Rasmussen, 1994; Arvidsson et al., 2001; Tijink & Spoor, 2004; Horn et al., 2008 und Botta et al., 2009).

#### 4.2 Erfolgskontrolle mit Multisensorsystem

Bei allem Nutzen, der sich aus dem Expertensystem mittels der Entscheidungsmatrix für die Planung von Investitionen und beim Maschineneinsatz ergibt, hat der Landwirt als Verantwortlicher für seinen Boden eine Erfolgskontrolle anzuschließen. Diese kann nur während der Befahrung mit der Maschine erfolgen. Erforderlich ist eine „in situ“ Messung, um ggf. die **Fahrzeugparameter an die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit eines Standortes** anzupassen.

Dazu wird im vorgeschlagenen Lösungsansatz die hydrostatische Setzungsmessung herangezogen. Sie liefert an einer repräsentativen Stelle eines Schrages die Rückmeldung aus dem Boden, inwieweit es bei der aktuellen mechanischen Belastung zu einer elastischen bzw. bleibenden Setzung kommt. Es interessiert besonders der nahe Unterboden um 40 cm, da in dieser Tiefe Frost und Bearbeitungsmaßnahmen kaum reparierend einwirken können.

Zur Verdeutlichung wird an dieser Stelle auf das Beispiel Silomais-ernte „Feldhäcksler + Häckselwagen direkt zum Silo“ (Abbildungen 9/10) zurückgegriffen. Je vier Messsonden werden in 30 und 40 cm Tiefe im unbefahrenen Bereich des Ackers in den Boden eingeführt und mit den Technikvarianten überrollt.

Das Vorderrad vom Maishäcksler führt in **30 cm** zu einer maximalen Setzung von 2,7 mm, bei der 0,75 mm verbleiben. Beim Transportfahrzeug reagiert der Boden unter dem Traktorhinterrad mit 2 mm und unter dem Silowagen mit 4,5 mm, 0,6 mm Setzung verbleiben.

In **40 cm** sind die Ausschläge bei der Befahrung geringer – der Boden federt elastisch zurück, so dass keine bleibende Setzung gemessen wird.

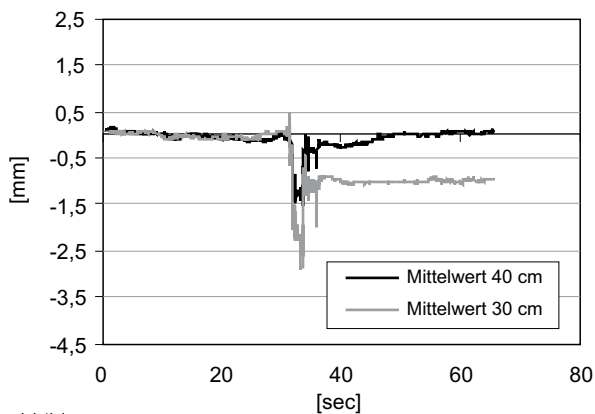


Abbildung 9:  
Bodensetzung in 30/40 cm Bodentiefe bei Befahrung mit Feldhäcksler (Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

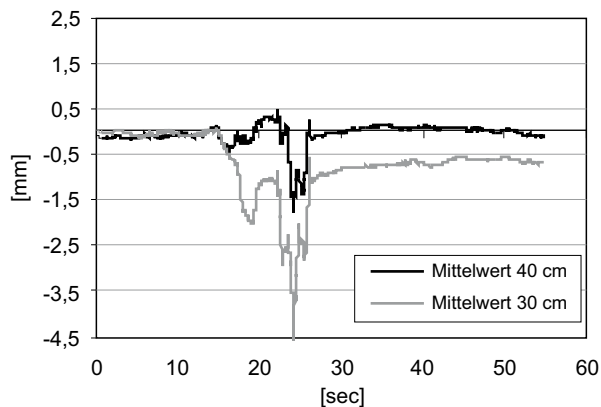


Abbildung 10:  
Bodensetzung in 30/40 cm Bodentiefe bei Befahrung mit Traktor + Häckselwagen (Tandem), (Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

Um die Eignung der **Setzungsmessung als Feldkennwert** zu überprüfen, wird sie mit den Laborwerten Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit (siehe Abbildungen 6/7) verknüpft. Für den Unterbodengefügeschutz interessiert insbesondere die Tiefe ab 40 cm. Die Luftkapazität reagiert geringfügig auf den Häcksler innerhalb der Stufe „mittel“, nicht aber auf den Silowagen. Bei Luftkapazität und gesättigter Wasserleitfähigkeit treten keine Veränderungen für die Belastungsvarianten auf, die statistisch abzusichern wären. Genauso zeigt es die Setzungsmessung an – es findet eine elastische Setzung statt, d. h. die Kennwerte haben sich kaum verändert.

Eine Anpassung der Fahrzeugparameter an die Verdichtungsgefährdung des Bodens ist in diesem Fall nicht erforderlich. Die hydrostatische Setzungsmessung liefert im Sinne der Erfolgskontrolle ein Instrument im Feld, die aktuelle Bodensetzung zu bestimmen (Brunotte et al., 2007b,c). Die Verknüpfung dieser Setzungsmessung mit der online Spurtiefenmessung (durch Ultraschallsensor unter der Maschinenachse, siehe Abbildung 3) liefert dem Maschinenführer klare Informationen über die Befahrbar-

keit von Ackerschlägen. Wird z. B. bei einer Spurtiefe von 7 cm in 40 cm Bodentiefe eine elastische Setzung gemessen, kann der Fahrer davon ausgehen, dass bis zu dieser Spurtiefe keine Veränderung der Kennwerte auftritt.

Wird allerdings bei der Befahrung eine Spurtiefe von z. B. 10 cm dauerhaft überschritten und mit der Setzungsmessung an diesen Stellen eine plastische Verformung > 1 mm angezeigt, können Bodenfunktionen gefährdet sein. Hier hat eine Anpassung der Fahrzeugparameter an die erhöhte Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes zu erfolgen.

Ein erster Schritt kann sein, die Silowagen nur 2/3 zu füllen und gleichzeitig in einer versetzten Spur zum Häcksler zu fahren, um die Überrollhäufigkeit zu senken. Die reduzierte Radlast kann aber nur dann Boden schonend wirken, wenn zusätzlich der Reifennendruck angepasst wird. Da keine Kenntnis über die aktuelle dynamische Radlast existiert, helfen Ultraschallsensoren in der Felge des Traktors und des Silowagens zur Messung der Reifeneinfederung (Abbildung 3). Der Reifennendruck wird solange reduziert, bis der maximal zulässige Einfederungswert erreicht wird – damit hat eine Anpassung des Reifennendruckes an die reduzierte Radlast stattgefunden. Der maximal zulässige Einfederungswert eines Reifens ist keine Konstante, sondern eine Funktion des Reifennendruckes. Bei dem Traktorreifen 650/65 R 38 bewegt sich der maximale Einfederungswert z. B. für Reifennendrucke zwischen 0,4 bar und 1,2 bar im Bereich von ca. 160 bis 120 mm. So wird das Potential des Reifens ausgenutzt, die dynamische Last auf maximaler Kontaktfläche abzustützen und den Bodendruck zu mindern.

Ein weiterer Schritt ist die Veränderung der Silomais-Verfahrenskette, indem ein Umladewagen den Silomais-transport auf dem Feld in versetzter Spur übernimmt und am Feldrand auf LKW-Sattelzüge überlädt (Abbildung 8, gestrichelte Gerade, Schnittpunkt 2). Dies hat den Vorteil, dass sehr viel größere Reifen (1050er) an dem Umladewagen genutzt werden können und der Reifennendruck aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit auf dem Feld auf unter 1,5 bar abgesenkt werden kann. Ähnliche Beispiele lassen sich für Mähdrusch-, Kartoffel- und Rübenerte entwickeln.

#### Zwischenfazit

*Mi einer Anpassung der Fahrzeugparameter an den aktuellen Verdichtungsstatus des Bodens kann die Erntearbeit unter Berücksichtigung der Bodenschutzbelange mit verminderter Flächenleistung fortgesetzt und braucht nicht abgebrochen zu werden. Verminderte Flächenleistung bedeutet bei den teuren Spezialmaschinen eine direkte Erhöhung der Arbeitserledigungskosten pro Hektar. Nutzt der Landwirt nicht diese Möglichkeit der Anpassungsstrategie, bleiben zwar die Direktkosten der Ernte*



niedrig, die Folgekosten steigen jedoch. Dazu gehört z. B. ein erhöhter Aufwand von ca. 40 bis 50 EURO/ha bei der Bestellung der Folgefrucht Winterweizen, die nicht mehr mit dem Grubber, sondern mit dem Pflug erfolgen muss.

Weiter können durch die Befahrung Ertragseinbußen als Direkt- bzw. Nachwirkung aufgrund geschädigter Bodenstruktur entstehen. In der Kausalkette Gefüge – Wurzeln – Ertrag wurden zu Beginn die beiden Laborparameter Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit herangezogen – beides Bestandteile des Indikatorsystems nach Lebert et al., 2004. Die **Feldgefügeansprache** ist der 3. wichtige Parameter im Feld, dargestellt durch Wurzelentwicklung und Aufwuchs. Der **Indikator Ertrag** fasst im Feld die Auswirkungen einer mechanischen Belastung in Summa recht gut zusammen.

Auch andere Versuchsansteller haben diesen Feldparameter genutzt, um eine eventuelle Schädigung von Bodenfunktionen durch landwirtschaftliche Fahrzeuge zu quantifizieren (u.a. Håkansson et al., 1985; Chamen et al., 1990; Johnson et al., 1990; Lipiec & Simota, 1994; Mähner, 1999; Vorhees, 2000; Arvidsson et al., 2001; Duiker, 2004; Koch et al., 2007; Kreitmayr, 2009). Bei älteren Belastungsversuchen ist zu berücksichtigen, dass Diagonalreifen, die nur ein geringes Boden schonendes Potenzial entwickeln konnten, an Stelle der heute üblichen Radialreifen eingesetzt wurden.

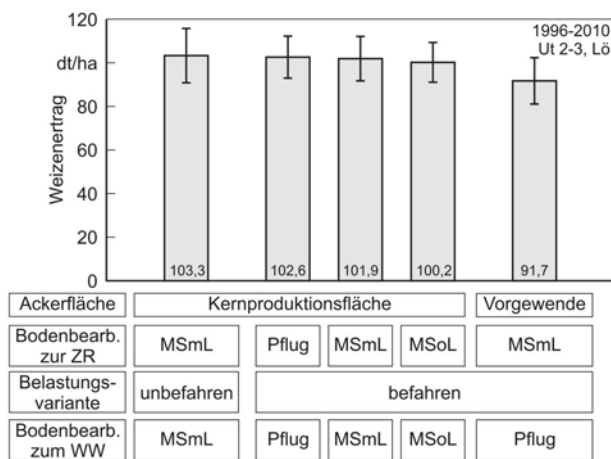


Abbildung 11: Winterweizenertrag nach Zuckerrüben, variiert nach mechanischer Belastung und Bodenbearbeitung (Ut 2 bis 3, Löss, 1996 bis 2010)

In den eigenen Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von 15 Jahren die Direkt- und Nachwirkungen der Befahrung mit sechsreihigen Zuckerrübenrodern am folgenden Weizen quantifiziert (Abbildung 11). Dargestellt ist für einen tonigen Schluff der Weizenertrag als Direktwirkung der Befahrung in einer Blockanlage für die 3-gliedrige Fruchtfolge Zuckerrüben-Weizen-Weizen. In

den 15 Jahren hat der Weizen fünf Mal nach Zuckerrüben gestanden und skizziert damit auch die Nachwirkung der Befahrung.

Die betrachtete Ackerfläche ist aufgrund stark variierter Belastungen in Kernproduktionsfläche und Vorgewende unterteilt. Auf der Produktionsfläche sind sowohl zur Zuckerrübe als auch zum Weizen die Bodenbearbeitungsverfahren Pflug (P)/Mulchsaat mit krumentiefer Lockerung (MSmL) und Mulchsaat ohne Lockerung (MSoL; 10 cm flache Bearbeitung) durchgeführt worden. Das Vorgewende weicht etwas davon ab – im Sinne verbesserter Tragfähigkeit, insbesondere im Bereich der Mietenablage, erfolgte zur Rübe eine Mulchsaat. Nach der Rübenabfuhr wurde für das Vorgewende eine Pflugfurche als praktikable Bodenbearbeitung gewählt.

„Unbefahren“ bedeutet, nicht wieder neu befahren im Zeitraum von der Zuckerrübenbestellung über die Ernte bis zur Weizenbestellung. Sie gilt als Kontrolle und wurde in die MSmL gelegt, da diese Form der Bodenbearbeitung zur Zuckerrübe heute üblich ist.

In der Kernproduktionsfläche hat der Weizenertrag im Vergleich zu „unbefahren“ kaum auf die Befahrung reagiert. Nur bei flacher Bearbeitung (MSoL) ergibt sich eine geringe Minderung von ca. 3 dt/ha, die statistisch nicht signifikant ist. Demnach ist eine krumentiefe Lockerung (P, MSmL) im Mittel der Jahre rentabel. Treten allerdings hohe Radlasten in Kombination mit hoher Überrollhäufigkeit auf, wie am Vorgewende, ist mit einer Ertragseinbuße von 10 % zu rechnen.

Die Bodenbearbeitung in der Kernproduktionsfläche hat demnach eventuelle Verdichtungen der Ackerkrume repariert, so dass die Ertragsfunktion nicht geschädigt wurde. Die Ertragsminderungen im Vorgewendebereich deuten auf eine Beeinträchtigung der Bodenstruktur im nahen Unterboden hin. Dieser Unterschied zeigt, dass die Zuordnung der mechanischen Belastung auf Teilbereiche des Ackerschlagelages wichtig ist.

## 5 Schlussfolgerungen

Sehr früh ist der Einsatz von Landtechnik mit seinen Auswirkungen auf die Bodenstruktur untersucht worden. In den letzten 25 Jahren sind vermehrt Schätzmodelle und Berechnungsmethoden hinzugekommen, um die Wechselwirkungen zwischen Fahrwerk und Boden abzubilden und in der Fläche darzustellen. Auch sollte damit der hohe Aufwand von anwendungsorientierten Feldversuchen umgangen werden. Aus Schätzmethoden konkrete Handlungsempfehlungen zum vorsorgenden Bodenschutz abzuleiten, ist bisher jedoch nicht gelungen, da der aktuelle Gefügestand und dessen Bedeutung für die Bodenfunktionalität über das gesamte Profil nicht dargestellt werden konnten. Vor diesem Hintergrund geben nur Statuserhe-

bungen und Informationen aus Dauerbeobachtungsflächen Auskunft über Verbreitung und Brisanz von Bodenschadverdichtungen durch den Landmaschineneinsatz.

Um den konkreten Einfluss von Fahrwerken auf die Veränderung der Bodenstruktur nachzuweisen, sind systematische Belastungsversuche erforderlich. Die Vielzahl der national und international durchgeführten Untersuchungen bilden zwar die Beziehung Fahrwerk-Boden über einen begrenzten Zeitraum ab, in der Regel aber nur unter „worst case“-Bedingungen und ohne den Bezug zum praktischen Einsatz von Landmaschinen herzustellen. Die Veränderungen an der Bodenstruktur werden punktuell sowohl mit bodenphysikalischen Parametern als auch mit Ertragsparametern belegt.

Was bisher fehlt, sind langfristige Untersuchungen, die eine Bewertung der Maschinen in ihrer gesamten Breite vornehmen. Diese Grundlage ist aber erforderlich, um sowohl für die Planung von Investitionen als auch für die Planung des Maschineneinsatzes während eines Jahres klare Hinweise zu geben. Darüber hinaus war bisher ein Erfassen der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit online durch Setzungs- und Spurtiefenmessung nicht möglich, um einzelne Fahrzeugparameter und ganze Verfahrensketten an kritische Bodenfeuchtigkeitszustände anpassen zu können.

Für den hier vorgeschlagenen **Lösungsansatz zum vorsorgenden Bodenschutz** wurde eine breite Grundlage mit anwendungsorientierten Feldversuchen (Bodenart Ut 2 bis 3, Löss, 750 bis 800 mm NS/a) über einen Zeitraum von 15 Jahren geschaffen, um die Auswirkungen einer Befahrung auf die Funktionalität der Bodenstruktur zu quantifizieren. In einem **Expertensystem** legte die Einstufung der eingesetzten Maschinen anhand bodenphysikalischer Untersuchungen und praktischer Erfahrungen die Basis für eine Entscheidungsmatrix, die schon im Vorfeld bei der Investition von Maschinen hilft, die Leistungsstärke an den Standort anzupassen.

Im nächsten Schritt erfasst im Rahmen einer **Erfolgskontrolle** ein neu entwickeltes Multisensorsystem beim Maschineneinsatz die aktuelle Reaktion des Bodens in Form der Setzung. Werden schädliche Veränderungen an der Bodenstruktur angezeigt, helfen online ermittelte Messwerte, das Zusammenspiel zwischen Last und Boden an der Schnittstelle Reifenkontaktfläche durch Anpassung des Reifendrucks zu optimieren (Abbildung 12).

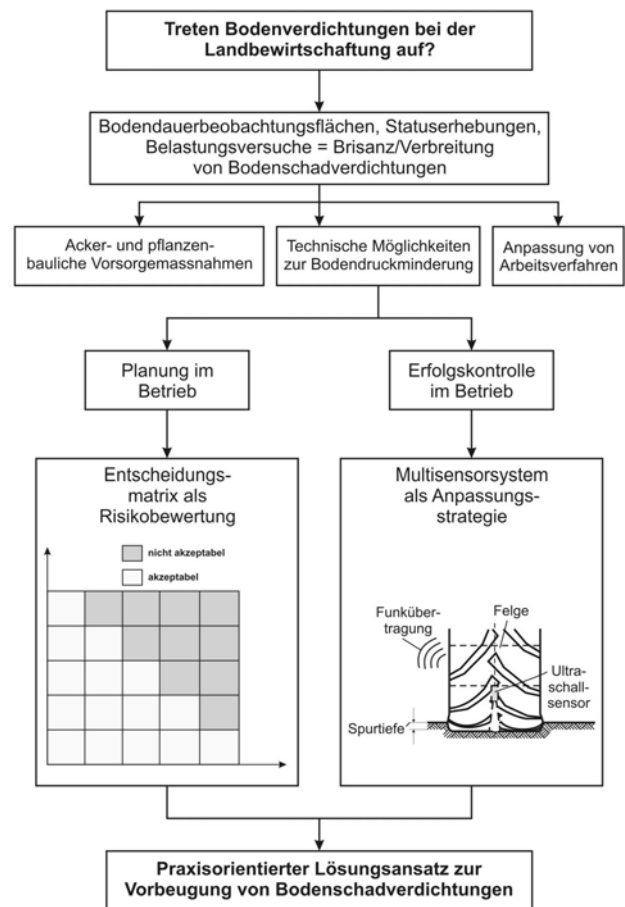


Abbildung 12: Übersicht zum praxisorientierten Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen

Diese Anpassungsstrategie berücksichtigt einerseits die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes und überlässt andererseits dem Landwirt die Verantwortung, im Rahmen seiner unternehmerischen Tätigkeit zwischen Rentabilität und Bodenschonung abzuwägen. Alternative Konzepte, die aus theoretischen Modellen starre Grenzen für mechanische Belastungen (Radlasten, Kontaktflächen drücke) ableiten, verkennen die Heterogenitäten der Bodenstruktur in Horizont, Feuchte und Funktionalität und die komplizierten Wechselwirkungen zwischen Maschine und Boden und stellen in ihrer Empfehlung meist lediglich eine wirtschaftliche Härte für die landwirtschaftlichen Betriebe dar. Der Erfolg, den Boden mit seinen Funktionen zu schonen, muss daran gemessen werden, inwieweit der Boden in seiner Komplexität berücksichtigt wird. Die notwendige Flexibilität bei den Maßnahmen erfüllt der hier vorgestellte Lösungsansatz für einen vorsorgenden Bodenschutz.

## Danksagung

Für die kritische Durchsicht des IV. Teils bedanken wir uns bei Herrn Robert Brandhuber, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Freising, Herrn Dr. Johannes Heyn, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Herrn Dr. Heiz-Josef Koch, Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen und Herrn Dr. Marco Lorenz, Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft Leipzig.

## Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Ansorge D, Godwin RJ (2007) The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction : part 1: Single axle-studies. *Biosystems Eng* 98:115-126
- Ansorge D, Godwin RJ (2008) The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction : part 2: Multi-axle machine studies. *Biosystems Eng* 99(3):338-347
- Ansorge D, Godwin RJ (2009) The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction : part 3: Comparison of virgin compression line approaches. *Biosystems Eng* 104:278-287
- Avidsson J, Andersson S (1997) Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. *Proceedings of the 14th International conference of ISTRO (ed):47-50*
- Avidsson J, Trautner A, Keller T (2002) Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. *Adv Geocol* 35:331-338
- Avidsson J, Trautner A, van den Akker JJH, Schjonning P (2001) Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil Tillage Res* 60:79-89
- Bolling I (1987) Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen : neue Meß- und Rechenmethoden. München : Selbstverl, 274 p, Forschungsber Agrartech Arbeitskreises Forsch Lehre Max-Eyth-Ges 133
- Botta GF, Tolon Becerra A, Bellora Tourn F (2009) Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Tillage Res* 103:381-386
- Brandhuber R (2005) Bodengefüge : Status und Veränderungen. Freising : LfL, SchrR Bayer Landesanst Landwirtsch 8:57-60
- Brandhuber R, Demmel M, Koch H-J, Brunotte J (2008) Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen : Empfehlungen für die Praxis. Frankfurt a M : DLG, 19 p, Merkl DLG 344
- Brandhuber R, Schäfer-Landefeld L, Koch H-J, Stockfisch N (2001) Sind heute übliche Fahrzeugmassen bei Rübenerte und Gülleausbringung mit den Zielen vorsorgenden Bodenschutzes vereinbar? Ergebnisse eines Forschungsprojektes. *Mitt Dt Bodenkundl Ges* 96(2):711-712
- Brunotte J (2007) Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Braunschweig : FAL, 159 p, Landbauforsch Völknerode SH 305
- Brunotte J, Demmel M, Fröba N, Uppenkamp N (2011) Boden schonen und Kosten sparen. Darmstadt : KTBL, KTBL-Heft (im Druck)
- Brunotte J, Fröba N (2007a) Schlaggestaltung - kostensenkend und bodenschonend. Darmstadt : KTBL, 178 p, KTBL-Schrift 460
- Brunotte J, Lorenz M, Sommer C, Harrach T, Schäfer W (2008) Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. *Ber Landwirtsch* 86(2):262-284
- Brunotte J, Nolting K, Lorenz M, Sommer C, Isensee E (2007b) Befahrbarkeits-sensor : flexibles Einsatzmanagement und Bodenschonung während der Ernte. *Zuckerrübe* 56(5):246-249
- Brunotte J, Sommer C, Isensee E, Lorenz M, Nolting K, Höltekemeyer V (2007c) Abschlussbericht zum Verbundprojekt „Entwicklung eines Online-Sensor-systems zur Erkennung der aktuellen Befahrbarkeit von Ackerböden“ : Förderkennzeichen: 03300316 BMBF, Laufzeit des Vorhabens: 01.10.03-31.12.06. Braunschweig : FAL, 93 p, Ber Inst Betriebstechn Bauforsch 394
- Brunotte J, Sommer C, Isensee E, Weisskopf P (2005) Der Boden unter Druck : abgelenkter Reifeninnendruck begrenzt die Bodenbelastung. *Landtechnik* 60(3):150-151
- Brunotte J, Weißbach M, Rogasik H, Isensee E, Sommer C (2000) Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrübenerntetechnik. *Zuckerrübe* 49(1):34-40
- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (1994) Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodengefüge, Bodenorganismen und bodenbiologische Prozesse sowie Pflanzenwachstum und Ertrag. Braunschweig : FAL, 206 p, Landbauforsch Völknerode SH 147
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG). *Bundesgesetzblatt* 1, 1998,FNA 2129-32, GESTA NO 18, geändert durch Art. 3 G vom 09.12.2004, 3214
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2001) Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bonn : BMVEL, 105 p
- Chamen WCT, Chithey FT, Leede PR, Goss MJ, Howse KR (1990) The effect of tyre soil contact pressure and zero traffic on soil and crop responses when growing winter wheat. *J Agric Eng Res* 47:1-21
- Chamen WCT, Alakukku L, Pires S, Sommer C, Spoor G, Tjink FGJ, Weisskopf P (2003) Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction : a review ; part 2, equipment and field practices. *Soil Tillage Res* 73(1-2):161-174
- Cramer B, Botschek J, Weyer T (2006) Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Bodenschutz* (3):64-71
- Danfors B (1974) Packning i alven. *Specialmeddelande / Jordbrukstekniska institutet* 24
- Diserens E, Spiess E (2004) Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden. *FAT Berichte* 613:1-16
- Diserens E, Steinmann G (2002) Calculation of pressure distribution in moist arable soils in Eastern Switzerland : a simple model approach for the practice. In: Vulliet L, Laloui L, Schrefler B (eds) *Environmental geomechanics*. Lausanne : EPFL-Press, pp 413-421
- Döll H (1998) Bewertung von Landwirtschaftsreifen nach agrotechnischen, ökologischen und technisch-energetischen Kriterien. *Forsttechn Informationen* 3:36-38
- Duiker S (2004) Avoiding soil compaction [online]. Zu finden in <http://pubs.Cas.Psu.Edu/freepubs/pdfs/uc186.pdf> [zitiert am 28.01.2011]
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1995) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil I, mechanische Belastbarkeit. Bonn : Wirtschafts- Verlagsges Gas Wasser, 12 p, DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234
- Eckert H, Paul R, Fettisov A (2006) Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung [online]. Zu finden in <http://www.tll.de/ainfo/pdf/bods0207.pdf> [zitiert am 28.01.2011]
- Ehlers W, Schmidtke K, Rauber R (2003) Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. *Landnutzung Landentwickl* 44:9-18
- Ehlers W, Werner D, Mähner T (2000) Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *Z Pflanzenernähr Bodenkd* 163(3):321-333
- Geischer R (2008) Bodenverdichtung unterschiedlicher Fahrwerke bei der Zuckerrübenernte : Forschungsergebnisse zu einem aktuellen Bodenschutz-thema. In: Informationstagung Landtechnik, Agroscope ART, Tänikon am 14.10.-15.10.2008
- Gertloff KH (1994) Verformungsmessungen an der Deponiebasis : Möglichkeiten und Erwartungen aus der Sicht eines Anwenders. In: Tagungsband, Braunschweig, 16. März 1994
- Gieska M, van der Ploeg, Schweigert P, Pinter N (2003) Physikalische Boden-degradierung in der Hildesheimer Börde und das Bundes-Bodenschutzge-setz. *Ber Landwirtsch* 81(4):485-511

- Gullich P, Paul R, Marre G, Plogsties A, Winterot Ch (2008) Bodenschutzplaner : Planungshilfe zur Vorsorge gegen Bodenerosion und -verdichtung zur feldblockbezogenen Abschätzung des Gefährdungspotentials im Landwirtschaftsbetrieb auf Excel-Basis (Version 2.08) [online]. Zu finden in <<http://www.tll.de/ainfo/pdf/bods1008.pdf>> [zitiert am 28.01.2011]
- Gysi M (2001) Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß. Tänkikon : FAT-Bibliothek, 8 p, FAT Berichte 566
- Håkansson J, Henriksson L, Gusstavsson L (1985) Experiments on reduced compaction of heavy clay soils and sandy soils in Sweden. In: International Conference on Soil Dynamics, June 17-19, 1985, Auburn, Alabama. Auburn : ICDS Conference pp 995-1009
- Harrach T, Pfeiffer B, Heitzmann S, Sauer S (2003) Langfristige nutzungsbedingte Bodendegradierung ackerbaulich genutzter Lössböden in Sachsen : Abschlussbericht, Gießen : Uni 144 p
- Horn R, Fleige H, Peth S (2009) Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde : Vorsorge- und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung von Böden in der Landwirtschaft. Bodenschutz (3):80-85
- Horn R, Fleige H, Richter F-H, Czyz EA, Dexter A, Diaz-Pereira E, Dumitru E, Enarache R, Mayol F, Rajkai K, de la Rosa D, Simota C (2005) SIDASS project Part 5: Protection of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. Soil Tillage Res 82(1):47-56
- Horn R, Rabbel W, Volk L (2008) Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen : Abschlussberichte zum BMELV-Verbundvorhaben, Teilvorhaben der Universität Kiel (FKZ: 03HS003/1) und der Fachhochschule Südwestfalen (FKZ 03HS003/2)
- Isensee E, Schwark A (2006) Langzeitwirkung von Bodenschonung und Bodenverdichtung auf Ackerböden. Ber Landwirtschaft 84(1):17-48
- Johnson JF, Vorhees WB, Nelson WW, Randall GW (1990) Soybean growth and yield affected by surface and subsoil compaction. Agron J 82(5):973-979
- Keller T, Arvidsson J, Dawidowski JB, Koolen AJ (2004) Soil precompression stress : II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. Soil Tillage Res 77:97-108
- Keller TH, Arvidsson J (2006) Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden : experiences from wheeling experiments. Arch Agron Soil Sci 52(2):207-222
- Koch HJ, Heuer H, Tomanova O (2007) Soil properties and sugar beet growth as affected by repeated passes of heavy machinery and soil tillage. VDI-Berichte 2001:447-453
- Kreitmayr J (2009) Verfahren der Bodenbearbeitung und Einfluss hoher Radlasten [online]. Zu finden in <[http://www.lfl.bayern.de/publikationen/iab/jahresbericht/38841/linkurl\\_0\\_0.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/iab/jahresbericht/38841/linkurl_0_0.pdf)> [zitiert am 28.01.2011]
- KTBL (2011) Biomasselogistik : planen, gestalten und bewerten. Darmstadt : KTBL, KTBL-Schrift (im Druck)
- Kühner S (1997) Simultane Messungen von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischer und dynamischer Belastung zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. 231 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkd Univ Kiel 39
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Berlin : Umweltbundesamt, 96 p, Texte / Umweltbundesamt 51/2010
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C (2004) Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden : Regelungen zur Gefahrenabwehr. Berlin : Umweltbundesamt, 122 p, Texte / Umweltbundesamt 46/2004
- Lebert M, Schäfer W (2005) Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz (2):42-46
- Lipiec J, Simota C (1994) Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: Soane BD, Ouwerkerk C van (eds) Soil compaction in crop production. Amsterdam : Elsevier, pp 365-390
- Mähner K-T (1999) Wachstum und Ertrag von Getreide nach mechanischer Bodenbelastung in unterschiedlichen Bearbeitungssystemen. Göttingen : Univ, 204 p
- Müller U (2004) Auswertungsmethoden im Bodenschutz : Dokumentation zur Methodendatenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Stuttgart : Schweizerbart, 409 p
- Nolting K, Brunotte J, Lorenz M, Sommer C (2006) Bodenverdichtung: Bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. Landtechnik 61(4):190-191
- Paul R (1999) Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. In: Einfluß der Großflächen-Landwirtschaft auf den Boden : Kolloquium, Jena, 6. Mai 1999. Jena : Thüringer Minist Landwirtschaft Naturschutz Umwelt, pp 54-59
- Rücknagel J (2006) Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Mitt Ges Pflanzenbauwissenschaften 18:154-157
- Ruhm E (1983) Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. Hannoversche Land- Forstwirtschaftl Zeitg 136(4):3-4
- Schäfer W (2008) Wenn dem Boden die Luft ausgeht – Verdichtung, Kriterien zur Bewertung [online]. Zu finden in <[http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/veranstaltungen/vortrag071205/05\\_Schaefer\\_Verdichtung.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/veranstaltungen/vortrag071205/05_Schaefer_Verdichtung.pdf)> [zitiert am 01.02.2011]
- Schäfer-Landefeld L, Brandhuber R, Fenner S, Koch H-J, Stockfisch N (2004) Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. Soil Tillage Res 75:75-86
- Schjonning P, Rasmussen KJ (1994) Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. Soil Tillage Res 29:215-227
- Schreiber M (2009) Auftretende Kräfte und physikalisch-mechanische Auswirkungen bei Kontakt zwischen Fahrwerk/Reifen landwirtschaftlicher Maschinen und ausgewählten Ackerflächen-Bodengefügen. Göttingen : Cuvillier, 301 p
- Sommer C, Brunotte J, Ortmeier B (2001) Bodenverdichtung : Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. Zuckerrübe 50(6):364-371
- Sommer C, Ruhm E, Altemüller H-J (1981) Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. Kali-Briefe 15(7):429-448
- Stahl H, Marschall K, Götze H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Dresden : LfL, 127 p, SchrR Sächsischen Landesanst Landwirtschaft 10(15)
- Strobel P (1989) Untersuchungen zur Abschätzung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden unter Berücksichtigung der Auswertung von Bodenkarten. Hannover : Univ, 112 p, Diplomarbeit
- Tijink FGJ, Spoor G (2004) Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. Zuckerindustrie 129(9):647-652
- Trautner A (2003) On soil behaviour during field traffic. Uppsala : Swedish Univ Agri Sci, Acta Univ Agric Sueciae 372
- van den Akker JHJ (2004) SOCOMO : a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. Soil Tillage Res 79:113-127
- Verein Deutscher Ingenieure (2007) Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden, VDI-Richtlinie 6101. Berlin : Beuth, 68 p
- Vorhees WB (2000) Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In: Horn R, van den Akker JHJ, Arvidsson J (eds) Subsoil compaction : distribution, processes and consequences. Reiskirchen : Catena-Verl, 462 p, Adv Geocol 32
- Voßbrink J (2005) Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkd, 107 p, SchrR Inst Pflanzenern Bodenkd
- Weißbach M (2003) Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Berlin : Logos-Verl, 197 p
- Wiermann C (1998) Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkd, 215 p, SchrR Inst Pflanzenern Bodenkd 45
- Zapf R (1997) Mechanische Bodenbelastung durch die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Bayern : flächenbezogene Quantifizierung des bewirtschaftungsbedingten Bodenverdichtungspotentials auf Ackerland. Freising-München : LBP, 33 p, Bodenkultur Pflanzenbau 7

## Abkürzungsverzeichnis

§	Paragraph
µm	tausendstel Millimeter
Abs.	Absatz
AG Boden	Arbeitsgruppe Boden
Ah/C Boden	terrestrischer Boden
Ap	Ap-Horizont
ATV-DVWK	Abwassertechnische Vereinigung-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutzverordnung
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (heute: BMELV)
BSRRL	Bodenschutz-Rahmen-Richtlinie
BT.-DRS.	Bundestagsdrucksache
BÜK	Bodenübersichtskarte
bzw.	beziehungsweise
“C”	Kohäsion
cm/d	Zentimeter je Tag
Corg	organischer Kohlenstoff
CTF	Controlled Traffic Farming
dB	Trockenrohdichte
defra	Department for Environment, Food and Rural Affairs
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN-V	DIN Vornorm
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
EEA	European Environment Agency
ENVASSO	ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring
EUA	Europäische Umweltagentur
FAL	Bundeforschungsanstalt für Landwirtschaft
FAO	Food and Agriculture Organization
GD-NRW	Geologischer Dienst-Nordrhein-Westfalen
ha	Hektar
HBU	Handbuch der Bodenuntersuchung
i. d. R.	in der Regel

i. S. d.	im Sinne der
k. A.	keine Angaben
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
KF	Kontaktfläche
kf	Wasserleitfähigkeit
KFD	Kontaktflächendruck
Koh.	Kohäsion
KOM	Kommission der Europäischen Gemeinschaften
kPa	Kilo Pascal (Pascal = Einheitsname für Druck)
KRB	Köpfrödebunker
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KUL	Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung
L	Lehm
Ld	effektive Lagerungsdichte
LK	Luftkapazität
LKW	Lastkraftwagen
ME	Mean Error (mittlerer Fehler)
MOVIS	Motion Vehicle Information System
MSmL	Mulchsaat mit Lockerung
MSoL	Mulchsaat ohne Lockerung
n	Anzahl Wiederholungen
nFK	nutzbare Feldkapazität
NS	Niederschlag
Nvtlg.	Normalverteilung
org. Substanz	organische Substanz
P	Perzentilwert
pF	Dekadischer Logarithmus der in cm Wassersäule ausgedrückten Wasserspannung in Böden
"phi"	Winkel der inneren Reibung
PTF	Pedotransferfunktion
PV	Porenvolumen
Pv	Vorbelastung
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RAMSOIL	risk assessment methodologies for soil threats
REPRO	Betriebsbilanzierungsmodell der Universität Halle
resp.	respektive
RETC	Retention Curve Model for Soil Water Models and Modeling
RL	Radlasten
RMSE	Root Mean Square Error

SIDASS	Model to predict losses due to mechanical and hydraulic processes
SIWG	Soil Information Working Groups
SoCo	Sustainable Agriculture and Soil Conservation
SOCOMO	SOil COmpaction MOdel
SRU	der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
SST	Stress State Transducer
T	Ton
TASC	Tyres/Tracks And Soil Compaction
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
U	Schluff
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vol.	Volumen
Vol. %	Volumenprozent
vTI	Johann Heinrich von Thünen-Institut
WBB	Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrüben
z. Zt	zur Zeit

**Bodenartengruppen:**

ll	Normallehme
ls	Lehmsande
lt	Lehmtone
lu	Lehmschluffe
sl	Sandlehme
ss	Reinsande
su	Sandschluffe
tl	Tonlehme
tu	Tonschluffe
us	Schluffsande
ut	Schlufftone

**Bodenartenuntergruppen:**

Ss	reiner Sand
St	toniger Sand
Sl	lehmiger Sand

Su	schluffiger Sand
Ut	toniger Schluf
Lu	schluffiger Lehm
Uls	sandig-lehmiger Schluff
Us	sandiger Schluff
Uu	reiner Schluff
Lts	sandig-toniger Lehm
Ts	sandiger Ton
Lt	toniger Lehm
Ls	sandiger Lehm
St	toniger Sand
Slu	schluffig-lehmiger Sand
Tt	reiner Ton
Tl	lehmiger Ton
Ts	sandiger Ton
Tu	schluffiger Ton