

Vol. 61 No. 1 03.2011

Landbauforschung

vTI Agriculture and Forestry Research



Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

Landbauforschung

Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research) ist ein wissenschaftliches Publikationsorgan des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei. Die Zeitschrift wird vom vTI herausgegeben und erscheint vierteljährlich. Die Sprache der Beiträge ist deutsch und englisch. Sonderhefte erscheinen nach Bedarf.

In der Zeitschrift werden Forschungsergebnisse aus der Ressortforschung des BMELV mit Bezug zur Land- und Forstwirtschaft und den ländlichen Räumen veröffentlicht, einschließlich Forschungsergebnissen aus Kooperationsprojekten, an denen das vTI beteiligt ist.

Die Landbauforschung ist eine multidisziplinär ausgerichtete Zeitschrift, die die verschiedenen Facetten der Agrar- und Forstwissenschaften einschließt und besonderes Augenmerk auf deren interdisziplinäre Verknüpfung legt.

Englischsprachige Beiträge sind erwünscht, damit die Forschungsergebnisse einem möglichst breiten wissenschaftlichen Diskurs zugeführt werden können.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich. Eine Haftungsübernahme durch die Redaktion erfolgt nicht.

Mit der Einsendung von Manuskripten geben die Verfasser ihre Einwilligung zur Veröffentlichung. Die von den Autoren zu beachtenden Richtlinien zur Einreichung der Beiträge sind unter www.vti.bund.de oder bei der Geschäftsführung erhältlich. Das exklusive Urheber- und Verwertungsrecht für angenommene Manuskripte liegt beim vTI. Es darf kein Teil des Inhalts ohne schriftliche Genehmigung der Geschäftsführung in irgendeiner Form vervielfältigt oder verbreitet werden.

Indexed in:

CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents - Agriculture, Biology & Environmental Sciences

Herausgeber

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

Gutachtergremium

Siehe 3. Umschlagseite

Schriftleitung

Prof. Dr. Folkhard Isermeyer

Geschäftsführung

Dr. Matthias Rütze

Tel. 040 · 739 62 - 247

Leuschnerstraße 91

21031 Hamburg, Germany

landbauforschung@vti.bund.de

www.vti.bund.de

ISSN 0458-6859

Alle Rechte vorbehalten.

vTI Agriculture and Forestry Research

Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research) is a scientific journal of the Johann Heinrich von Thünen Institute (vTI), Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries. The journal is published quarterly by the vTI. The articles appear in either German or English. Special issues are published as required.

The journal publishes research results under the auspices of the German Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV). Articles bear relevance to agriculture and forestry, as well as to rural areas, and include research results from cooperative projects involving the vTI.

vTI Agriculture and Forestry Research is a multidisciplinary journal, encompassing the various facets of this field of research and placing a particular emphasis on interdisciplinary linkages.

English language contributions are desired so that the research results can achieve as broad a scientific discourse as possible.

The authors are responsible for the content of their papers. The publishers cannot assume responsibility for the accuracy of articles published.

With the submission of a manuscript, the author grants his or her permission for publication. Authors are requested to follow the guidelines for submission found at www.vti.bund.de or available from the management.

The vTI retains exclusive copy and usage rights for accepted manuscripts. No portion of the content may be duplicated or distributed in any form without the written permission of the publisher.

Indexed in:

CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents - Agriculture, Biology & Environmental Sciences

Publisher

Johann Heinrich von Thünen Institute (vTI)

Editorial Board

Directors of vTI-Institutes

Editor in Chief

Prof. Dr. Folkhard Isermeyer

Managing

Dr. M.

Phone + 49 - 40 · 739 62 - 247

Leuschnerstraße 91

21031 Hamburg, Germany

landbauforschung@vti.bund.de

www.vti.bund.de

ISSN 0458 – 6859

All rights reserved.

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis

Vulnerability to compaction of agricultural subsoils – validation of pedotransfer function for identification of risk areas in Europe and a practicable solution for good farming practice that avoids subsoil compaction

Thomas Vorderbrügge und Joachim Brunotte

Teil I: Validierung von Pedotransferfunktionen

- 1 Part I: Validation of pedotransfer function

Thomas Vorderbrügge und Joachim Brunotte

Teil II: Bewertung eines Vorschlasses zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen

- 23 Part II: Appraisal of a proposal for deriving precautionary values for judging soil compaction according to the German federal soil protection act and of new pedotransfer function for identifying risk areas „compaction“ in Germany

Thomas Vorderbrügge und Joachim Brunotte

Teil III: Ausweisung von „Risiko Gebieten“ auf Basis von Pedotransferfunktionen – die aktuelle Situation in Europa

- 41 Part III: Risk area identification „soil compaction“ by making use of pedotransfer function – the current state in Europe

Joachim Brunotte Thomas Vorderbrügge, Klaus Nolting und Claus Sommer

Teil IV: Ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen

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

Abkürzungsverzeichnis

- 71 List of abbreviations

Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis

Teil I: Validierung von Pedotransferfunktionen

Thomas Vorderbrügge* und Joachim Brunotte**

Zusammenfassung

Ein wichtiges Thema der nationalen und internationalen Diskussion zur Bodenschutzstrategie der EU ist die Erstellung von fachlichen Grundlagen und Kriterien zur Ausweisung so genannter „Risikogebiete“. In diesen Gebieten sollen Gefährdungen der Böden bspw. durch Erosion, Verlust an organischer Substanz oder Verdichtung in einer kritischen Größenordnung auftreten.

Mangels einer ausreichend validen und plausiblen Datengrundlage zum Status der Bodenverdichtung bzw. zur Verdichtungsanfälligkeit der Böden in Deutschland, insbesondere der Unterböden, kommt es zu einer vermehrten Anwendung von Regressionsmodellen (Pedotransferfunktionen) zur Berechnung der Gefährdung durch Verdichtung. Auswertungen hierzu finden sich für die unterschiedlichsten Maßstabsebenen, von „parzellenscharf“ bis hin zu einer bundesweit flächendeckenden Auswertung im Maßstab 1:1.000.000. Der Einsatz dieser Pedotransferfunktionen ist allerdings nicht unproblematisch, zum einen aufgrund ihres umfassenden Bedarfs an Eingangsdaten, zum anderen aber auch aufgrund der aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes noch unzureichenden Überprüfung der Ergebnisse im Hinblick auf Repräsentativität, Reproduzierbarkeit, Plausibilität und Validität. Es mangelt zudem an Untersuchungen in denen Ergebnisse einer Prognose den entsprechenden Messwerten gegenübergestellt werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie wichtig es ist, modellierte mit gemessenen Werten zu vergleichen, Pedotransferfunktionen im Hinblick auf ihre Gültigkeit und ihren Gültigkeitsbereich zu hinterfragen und flächendeckende Aussagen in Form einer Karte kritisch zu begleiten, nicht zuletzt unter dem Aspekt der aktuellen Vorschläge zur Definition von Vorsorgewerten im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes.

Schlüsselwörter: Bodenschutz, Bodenverdichtung, Unterbodenverdichtung, Bodenschutzstrategie, Bodenschutzrahmenrichtlinie, Risikogebiete, Verdichtungsgefährdung, Vorsorgewerte, Vorbelastung, Bodenschadverdichtung, Pedotransferfunktionen, Validierung, Bodengefüge

Abstract

Vulnerability to compaction of agricultural subsoils – validation of pedotransfer function for identification of risk areas in Europe and a practicable solution for good farming practice that avoids subsoil compaction

Part I: Validation of pedotransfer function

An essential part of the European soil strategy is the development of criteria and basic information for threats to soil quality in Europe. The characterisation of soil degradation risk by erosion, the loss of organic carbon or subsoil compaction is an important aspect in developing that strategy.

But there is still a lack of valid data on the status of subsoil compaction and the susceptibility of subsoils to compaction respectively. Therefore, a lot of models (pedotransferfunctions) have been developed to estimate the susceptibility of subsoils to compaction. These functions are applied in precision agriculture (farm level) up to a scale of 1:1.000.000. The use of these functions seems to be problematic. On the one hand there is a great need of data, on the other hand there is only a poor validity of the models. The comparison of measured data with modeled data is rare as well and often shows a weak correlation between.

This paper shows the significance of comparing modeled data with measured data, of defining the validity of the models and of checking the proposals regarding new definitions of values for assessment of subsoil compaction.

Keywords: Soil conservation strategy, soil compaction, soil framework, risk areas, subsoil compaction, pre compression stress, pedotransferfunction, soil structure, validation, pedotransfer rules

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

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

1 Einleitung

In ihrem „Zweiten Bodenschutzbericht“ veröffentlichte die Bundesregierung eine Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete“ (Bt.-Drs. 16/12658, 2009). Diese Karte ist Ergebnis einer Studie, die im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführt wurde (Lebert, 2008; Glante et al., 2009; Lebert & Marahrens, 2009; Marahrens & Lebert, 2009). Sie kann als ein erster Versuch gesehen werden, eine Methode zur Ausweisung von „risk areas“ (Eckelmann et al., 2006; van den Akker & Simota, 2007) im Sinne der Bodenschutzstrategie der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KOM(2002)179 end. 2002, KOM(2006)232 end. 2006; Bas et al., 2008) vorzustellen. Aufgrund der z. Zt. vorherrschend kritischen Haltung gegenüber einer Bodenschutz-Rahmenrichtlinie (BSRRL) der Kommission sollte die methodische Grundlage der Karte unbedingt valide sein. Ansonsten wären Schlussfolgerungen, die sich aus dieser Karte ziehen lassen, sowie mögliche Konsequenzen für den vorsorgenden Bodenschutz bzw. für die Beratung und Praxis kaum von einem breiten fachlichen Konsens gestützt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die in den Karten ausgewiesenen Gebiete unterschiedlicher „Verdichtungsempfindlichkeit“ nicht automatisch gleichzusetzen sind mit dem dort vorzufindenden tatsächlichen Gefügezustand der Unterböden (Brunotte et al., 2008).

Bodenkundliche Grundlage der Karte ist die „Nutzungs-differenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000000, Version 2.3“ (BÜK 1000 N) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Richter et al., 2007). Methodische Grundlage sind die im Rahmen der erwähnten UBA-Studie verifizierten und modifizierten Pedotransferfunktionen zur Ableitung der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit nach DVWK (1995, 1997), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002). Die UBA-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass über 50 % der ackerbaulich genutzten Flächen im Unterboden bei einer der Feldkapazität ($pF\ 1,8$) entsprechenden Bodenfeuchte eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen. Besonders betroffen sind danach die Böden der Jungmoränenlandschaften, des Lössgürtels, des Tertiärhügellandes sowie der Marschen im Küstenbereich (Bt.-Drs. 16/12658, 2009). Nach dieser Karte ist z. B. für Hessen der Anteil an Böden mit einer hohen Verdichtungsempfindlichkeit äußerst groß, u. a. aufgrund des großen Anteils lössbürtiger Böden. Auch für Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Bayern werden großräumig Flächen mit Böden hoher Verdichtungsempfindlichkeit ausgewiesen.

Die Entwicklung des Verfahrens zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit resp. mechanischen Verdich-

tungsempfindlichkeit wird in der UBA-Studie ausführlich dargestellt (Lebert, 2008). Als bodenphysikalischer Kennwert für die mechanische Belastbarkeit dient die so genannte Vorbelastung (P_v). Sie ist ein summarischer Ausdruck für die „Festigkeit“, die „Widerstandskraft“ des Bodengefüges gegenüber einer (zusätzlichen) mechanischen Belastung. Die Definition gemäß DIN (1998) lautet: **Vorbelastung** (Kehrwert der Verdichtungsempfindlichkeit) – „höchstmöglicher Belastungswert, bis zu dem der ungesättigte, strukturierte Boden nicht zusätzlich irreversibel bzw. bleibend verformt wird“. Die metrischen Angaben dieser Größe erfolgen in kPa.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden zunächst die methodischen Grundlagen und die wichtigsten Ergebnisse der UBA-Studie (Lebert, 2008) dargestellt. Darauf aufbauend werden die im Rahmen der UBA-Studie entwickelten Pedotransferfunktionen im Hinblick auf Validität und Übertragbarkeit überprüft. Im zweiten Teil der Arbeit wird aufgezeigt, ob die von Horn et al. (2009) publizierten Grenzwerte der Vorbelastung eine Grundlage für das Wertesystem des Vorsorgenden Bodenschutzes i. S. des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) bzw. der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) sein können. Weiterhin wird dargelegt, ob die Ergebnisse der UBA-Studie, insbesondere die dort verifizierten bzw. neu formulierten Transferfunktionen, geeignet sind, „risk areas“ im Sinne der BSRRL auszuweisen. Der dritte Teil dieser Arbeit beschreibt den aktuell in der Fachliteratur beschriebenen Status der Unterbodenverdichtung in Europa, sowie die z. Zt. diskutierten Verfahren zur Ausweisung von Risikogebieten gemäß BSRRL. Im vierten Teil wird ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis aus anwendungsorientierten Versuchen entwickelt. Er soll den Betrieben bei der Planung von Investitionen und vom Maschineneinsatz helfen und eine Erfolgskontrolle ermöglichen.

Ziel dieser Beiträge ist es, die aktuelle Diskussion zur Flächenbezogenen Bewertung und Darstellung der mechanischen Bodenbelastbarkeit sowie zu Vorschlägen von Grenzwerten der Vorbelastung durch die Ergebnisse einer Validierung der Transferfunktionen kritisch zu begleiten und mögliche Fehlentwicklungen aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes aufzuzeigen.

2 Methodik und Ergebnisse der UBA-Studie „Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ (Lebert, 2008)

Für die Herleitung des neuen Ansatzes standen Lebert (2008) „Messwerte“ der Vorbelastung von 180 Unterbodenhorizonten aus ca. 90 Profilen unter ackerbaulicher Nutzung zur Verfügung. Eine wesentliche Grundlage wa-

ren die Werte, die bereits für die Herleitung der Pedotransferfunktionen (PTF) nach DVWK (1995, 1997), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002) genutzt wurden. Streng genommen handelt es sich bei den „Messwerten“ nicht um eine tatsächliche Messung der Vorbelastung, sondern um „auf Messungen beruhenden Drucksetzungskurven mit Ableitung der Vorbelastung nach Casagrande“ (Brandhuber, 2010). Sie werden aber als „Messwerte“ bezeichnet, um sie im Folgenden sprachlich eindeutig von den Schätzwerten nach DVWK (1995) bzw. der DIN-V-19688 (1998) unterscheiden zu können.

Die 180 Datensätze wurden in Anlehnung an die vier Bodenartenhauptgruppen (Sand, Schluff, Lehm und Ton) der Bodenkundlichen Kartieranleitung, (5. Auflage – KA5) (Ad-hoc-AG Boden, 2005) in fünf Gruppen unterteilt: „Hochprozentige“ Sande, Sande mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff (Sandlehme, Schluffsande und der SI3), Schluffe, Lehme sowie Tone (Tabelle 1). Dies wird damit begründet, dass im Vergleich zu den lehmigen und tonigen Bodenartengruppen bei den Bodenartenuntergruppen dieser neuen Gruppe die Trockenrohdichte und nicht das Gefüge, definiert über die Parameter „Kohäsion“ oder den „Winkel der inneren Reibung“, einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Vorbelastung habe.

Mit den Daten wurde nun für die fünf Gruppen der Zusammenhang zwischen Rohdichte und Vorbelastung

berechnet. Die entsprechenden Regressionen sowie die zugehörigen Bestimmtheitsmaße sind in der Tabelle 2 angeführt.

Die vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaße von 7 bis 54 % sind Ausdruck einer sehr weiten Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade. Es fällt auf, dass neben der Steigung auch das für die Gruppe „Sande (II)“ ermittelte Bestimmtheitsmaß von ca. 26 % deutlich geringer ist, als das für die Gruppe der Schluffe mit ca. 48 %. Dies Ergebnis entspricht nicht ganz der Erwartung, da gemäß Begründung zur Stratifizierung der Bodenarten in der UBA-Studie (Lebert, 2008) bei dieser Gruppe der Einfluss der Trockenrohdichte auf die Vorbelastung eindeutiger und größer sein soll als für die tonreicherden Bodenartenuntergruppen.

Mangels einer ausreichend großen Grundlage an tatsächlich gemessenen Daten der Vorbelastung, die zudem repräsentativ für die in Deutschland vorkommenden Bodenformen sein soll, wurde im Rahmen der UBA-Studie eine erweiterte Schätzdatengrundlage geschaffen. Hierzu dienten bodenphysikalische Daten der Umweltbehörden, vor allem aus den Monitoringprogrammen wie z. B. der Bodendauerbeobachtung. Die von den Bundesländern zur Verfügung gestellten Daten stammen von ca. 1.300 Standorten mit insgesamt ca. 3.400 beprobten Horizonten. Für diese Proben gibt es, wie bereits erwähnt, keine Mess-

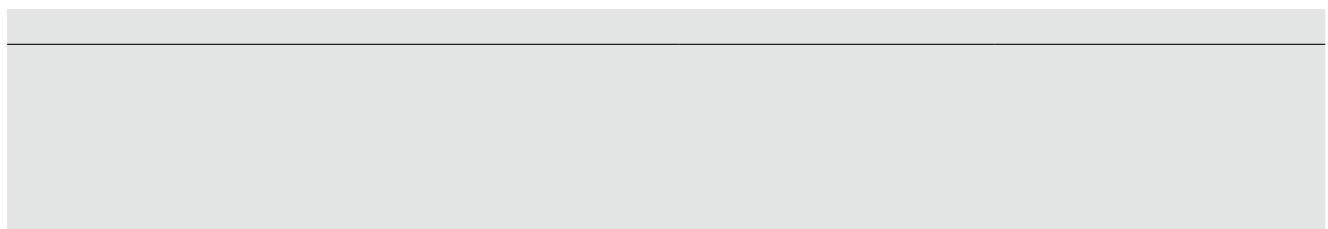
Tabelle 1:

Aufteilung der Bodenarten und Anzahl der verwendeten Datensätze für die Schätzung der Vorbelastung (Lebert, 2008) sowie die entsprechende Gruppierung nach „Bodenkundlicher Kartieranleitung – KA5“ (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl der Datensätze
Sande	100
Sand mit höheren Beimischungen	30
Schluffe	20
Lehme	10
Tone	10
Total	180

Tabelle 2:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte (x) und gemessener Vorbelastung (y) bei pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen (Lebert, 2008)



daten der Vorbelastung. Sie wurde deshalb nach den drei Verfahren DVWK 234 (1995), ATV-DVWK 901 (2002) und DIN-V-19688 (1998) geschätzt. Für jeden Horizont lagen als Grundlage für das weitere Vorgehen in der UBA-Studie somit die bodenphysikalischen Messwerte und jeweils drei zugehörige Schätzwerte der Vorbelastung vor.

Analog zum Vorgehen bei den 180 Messdaten wurde der Zusammenhang zwischen der Trockenrohdichte_(gemessen) und der Vorbelastung_(geschätzt) jeweils für die Schätzwerte nach DVWK 234 (1995), ATV-DVWK 901 (2002) und DIN V19688(1998) ermittelt. Die entsprechenden Regressionen zeigt Tabelle 3. Für die Ableitung der Regressionsgeraden zwischen Trockenrohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) wurden die gleichen Daten der Trockenrohdichte genutzt, die vorher für die Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung eingesetzt wurden. Dies ist bei der Beurteilung der Regressionen in Tabelle 3 zu berücksichtigen, da die Trockenrohdichte, vor allem bei den tonärmeren Bodenarten, gleichzeitig ein sehr sensibler Parameter in den PTF nach DVWK (1995), ATV-DVWK (2002) und DIN (1998) ist, die Frage einer Autokorrelation somit durchaus ein wichtiger Aspekt sein könnte.

Tabelle 3:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdiche (x) und geschätzter Vorbelastung (y) nach DVWK 234 (1995), ATV-DVWK-901 (2002) und DIN-V-19688 (1998) bei pF 1,8, getrennt nach den fünf Bodenartenhauptgruppen sowie nochmals die Angaben für die Regressionsgeraden auf Basis der *Messdaten* (s. Tabelle 2) („**fett**“ dargestellt sind die in der UBA-Studie als „geeignet“ ausgewählten Regressionen).

Aus der grafischen Gegenüberstellung der Streudiagramme der **messwert**basierten Trends mit den Streudiagrammen der **schätzwert**basierten Trends schließt die UBA-Studie, dass für die „hochprozentigen“ Sande die plausibelsten Ergebnisse mittels PTF nach DVWK 234 (1995), für alle anderen Bodenartenhauptgruppen hingegen mittels PTF nach DIN-V-19688 (1998) erreicht werden. Die Auswahl der geeigneten Transferfunktion erfolgte somit nicht anhand des „besten“ Bestimmtheitsmaßes, wie am Beispiel der Schluffe deutlich zu erkennen ist. Hier ergibt der Ansatz nach DVWK 234 (1995) ein Bestimmtheitsmaß von 74 %, der Ansatz nach DIN-V-19688 (1998) hingegen nur von 45 %. Da aber der visuelle Abgleich der Schätzwerte nach DVWK 234 (1995) mit den gemessenen Werten eine deutliche systematische Überschätzung ergab, hingegen die Schätzwerte nach DIN-V-19688 (1998) nur eine Überschätzung im Bereich geringer Trockenrohdichten, wurde die Schätzung nach DIN-V-19688 (1998) als plausibel und für das weitere Verfahren als am besten geeignet angesehen.

Die Auswahl der am besten geeigneten PTF zur Ableitung der Vorbelastung_(geschätzt) erfolgte somit nicht mittels eines statistisch gestützten Methodenvergleichs, z. B. anhand eines Fehlermaßes wie dem RMSE (Root Mean

Square Error, Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler; Willmott, 1981). Sie erfolgte visuell nach der grafisch geringsten Abweichung, also der Abschätzung einer systematischen Unter- oder Überschreitung der Schätzwerte der auf der Basis der Messwerte abgeleiteten Regressionsgeraden.

Ein Ziel der UBA-Studie ist es, den Leitprofilen der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007) für den Bereich des Unterbodens Werte der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit zuordnen zu können. Darüber lassen sich die Ergebnisse regionalisieren und „empfindliche“ Gebiete in Form einer Karte darstellen bzw. ausweisen. Da in den Legenden bzw. den Flächendaten der Leit- und Begleitprofile von Bodenkarten häufig die effektive Lagerungsdichte (Ld) angeführt wird und diese auch eine Vergleichbarkeit über alle Bodenartenuntergruppen erlaubt (Lebert, 2008), wurden die entsprechenden Regressionen für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung_(geschätzt) abgeleitet. So kann man, in Abhängigkeit von der Ld , die entsprechenden Schätzwerte der Vorbelastung den Leitprofilen der Legendeneinheiten zuordnen. Für die Gruppe der „hochprozentigen“ Sande erfolgte dies auf Basis der Vorbelastungswerte, die mit der Regression „**Schätzwerte** nach DVWK 234“ (1995) abgeleitet wurden. Für die übrigen Gruppen waren die Vorbelastungswerte Grundlage, die mit der entsprechenden Regression „**Schätzwerte** nach DIN-V-19688“ (1998) abgeleitet wurden.

In den Flächendaten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007; Adler, 2008) wird allerdings nicht die Ld angeführt sondern die Trockenrohdichte. Wie die jeweilige Ld für die Unterbodenhorizonte der Leitprofile der „BÜK 1000 N“ (Richter et al., 2007) festgelegt wurde, ist der UBA-Studie nicht eindeutig zu entnehmen.

Da für die Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ nicht die Bodenartenhauptgruppen, sondern die Bodenartenuntergruppen angeführt werden und der Ansatz auch für die Methodenbanken der einzelnen Bundesländer anwendbar sein soll, wurden in der UBA-Studie die Zusammenhänge nun für die Bodenartengruppen berechnet. Allerdings auch hier mit einer Änderung im Vergleich zur Systematik der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Als Ergebnis einer weiteren Plausibilitätsprüfung wurden die Daten mit der Bodenart SI3 nicht der Gruppe der Lehmsande, sondern der Gruppe der Sandlehme zugeordnet.

Die Tabelle 4 zitiert die 11 Regressionen für den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN V 19688 (1998) aus der UBA-Studie.

Die relativ geringen Bestimmtheitsmaße von 23 – 68 % der sandarmen Texturgruppen sind Ausdruck der sehr großen Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade, obwohl die der Ld zugrunde liegende Trockenrohdichte als äußerst sensibler Parameter bereits in die Schätzung der Vorbelastung nach DVWK (1995), DIN (1998) sowie ATV-DVWK (2002) mit eingeflossen ist. Für die Reinsande und Lehmsande ergeben die Regressionen erst ab einer Ld von 1,22 bzw. 1,32 positive Werte der Vorbelastung, d. h. bei Werten der Ld von < 1,22 bzw. 1,32 errechnen sich negative, und damit nicht plausible Werte der Vorbelastung.

Schließlich wurde aus den Messwerten der Daten der Ld aus den Bundesländern eine Matrix mit den Mittelwerten für die fünf Klassen der Ld , jeweils für die einzelnen Bodenartengruppen, erstellt. Damit wurde überprüft, ob die tatsächlichen Mittelwerte der Daten aus den Bundesländern mit den Klassen-Mittelwerten der KA5 übereinstimmen. Da diese Übereinstimmung vorlag, konnten mit Hilfe der Regressionsgeraden der Tabelle 4 für die einzelnen Bodenartengruppen

Tabelle 4:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte_(errechnet) (x) und Vorbelastung_(geschätzt) (y) nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) bei einer Wasserspannung von pF 1,8 für die 11 Bodenartengruppen (Lebert, 2008).

Bodenartengruppe	$y = a + b \cdot x$	a	b	R^2
Lehm-sandiger Sand	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (1)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (2)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (3)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (4)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (5)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (6)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (7)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (8)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (9)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (10)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (11)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (12)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (13)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (14)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (15)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (16)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (17)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (18)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (19)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (20)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (21)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (22)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (23)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (24)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (25)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (26)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (27)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (28)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (29)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (30)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (31)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (32)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (33)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (34)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (35)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (36)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (37)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (38)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (39)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (40)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (41)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (42)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (43)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (44)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (45)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (46)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (47)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (48)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (49)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (50)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (51)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (52)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (53)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (54)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (55)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (56)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (57)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (58)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (59)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (60)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (61)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (62)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (63)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (64)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (65)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (66)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (67)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (68)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (69)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (70)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (71)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (72)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (73)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (74)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (75)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (76)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (77)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (78)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (79)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (80)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (81)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (82)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (83)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (84)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (85)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (86)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (87)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (88)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (89)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (90)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (91)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (92)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (93)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (94)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (95)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (96)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (97)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (98)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (99)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (100)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (101)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (102)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (103)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (104)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (105)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (106)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (107)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (108)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (109)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (110)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (111)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (112)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (113)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (114)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (115)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (116)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (117)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$	0,0000	0,0000	0,00
Lehm-sandiger Sand (118)	$y = 0,0000 + 0,0000 \cdot x$			

Tabelle 5:

Beispielhafte Ableitung der Werte der Vorbelastung (P_v) mittels Transferfunktion in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte (Ld) für die Bodenartengruppe „II“ als Grundlage für eine Zuordnung mittlerer Vorbelastungswerte von einzelnen Horizonten mit den Bodenarten Lt2, Ls2, Ls3 oder Ls4 der Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007).

	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
Anzahl	9	10	109	242	52
\bar{Ld} -Messwerte	1,36	1,51	1,71	1,91	2,04
\bar{Ld} nach KA5	1,30	1,50	1,70	1,90	2,05
Transferfunktion			$y = 128,64 \times (Ld \text{ nach KA5}) - 131,75$		
\bar{P}_v in kPa	35	61	87	113	132

die zugehörigen Werte der Vorbelastung für die jeweiligen fünf Klassenmittelwerte der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) berechnet werden. In der Tabelle 5 ist dies beispielhaft für die Bodenartengruppe der Normallehme (II) dargestellt.

Eine Legendeneinheit der „BÜK 1000 N“ mit einer Bodenartuntergruppe der Bodenartengruppe „II“, einer Ld der Klasse 3 und damit einer durchschnittlichen Vorbelastung von 87 kPa kann somit die entsprechende Stufe (hier: Stufe 3 = hoch) der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit zugeordnet werden. Mit Hilfe solch einer Matrix wird nun, in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte, allen Bodenartengruppen bzw. -untergruppen die entsprechende Klasse der Vorbelastung zugeschrieben.

Die im Rahmen der UBA-Studie entwickelten Transferfunktionen zur Ableitung der Vorbelastung auf Basis der Trockenrohdichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld) basieren somit auf:

1. 180 Messwerten der Vorbelastung für 90 Profile,
2. der Berechnung des Zusammenhangs zwischen Rohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(gemessen) für die 180 Werte, gruppiert gemäß den fünf definierten Bodenartenhauptgruppen,
3. Schätzung der Vorbelastung für ca. 3400 Horizontdaten von 1300 Standorten aus den Datenbeständen der Bundesländer nach den Methoden DVWK 234 (1995), DIN-V-19688 (1998) sowie ATV-DVWK 901 (2002),
4. Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens zur Schätzung der Vorbelastung,
5. Berechnung des Zusammenhangs zwischen Trockenrohdichte_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) für die 3400 Horizontdatensätze, getrennt nach Bodenartengruppen,
6. Berechnung der Regressionsgeraden zwischen effektiver Lagerungsdichte_(errechnet) und Vorbelastung_(geschätzt) für die 3400 Horizontdatensätze, getrennt nach den fünf Bodenartenhauptgruppen,
7. Ermittlung der jeweils fünf Klassenmittelwerte der effektiven Lagerungsdichte der einzelnen Bodenartengruppen für die ca. 3400 Datensätze der Bundesländer,

8. Erstellung der Matrix Vorbelastung_(geschätzt) in Abhängigkeit von den fünf Klassen der effektiven Lagerungsdichte auf Basis der Regressionsgeraden (s. Tabelle 4) und der mittleren Ld der jeweils fünf Klassen für alle Bodenartengruppen,
9. Zuordnung der Vorbelastung in Abhängigkeit von den Klassen der Ld und den Bodenartengruppen (s. bspw. Tabelle 5) für die einzelnen Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Richter et al., 2007) als Grundlage für die Darstellung in Form einer Karte.

3 Validierung der Pedotransferfunktionen (PTF) zur Schätzung der Vorbelastung anhand international publizierter Messdaten der Vorbelastung

Mit der Studie des UBA wurden seit 1981 insgesamt sieben Vorschläge von Transferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung publiziert. Eine ausführliche Übersicht der bisher publizierten Ansätze sowie die entsprechenden Quellen befinden sich in Tabelle 25 im 2. Teil dieser Arbeit. Durch die Publikation der Ergebnisse als „Karte der Verdichtungsempfindlichkeit“ im 2. Bodenschutzbericht der Bundesregierung bekommt dieser neue Ansatz naturgemäß einen anderen Stellenwert als ähnliche Auswertungen in Form von Karten mit dem Anspruch einer bundesweiten Gültigkeit aus dem Bereich der Forschung (Horn et al., 2001; 2002; 2005) oder aus Studien der EU wie ENVASSO, RAMSOIL, SIDASS oder SoCo (Kibblewhite et al., 2008; Horn et al., o.J.; Van den Akker & Simota, 2007; SoCo-Project Team, 2009). Zwar ist das UBA kein normsetzendes Gremium, von ihm publizierte Aussagen gelten allgemein aber als wissenschaftlich fundiert, validiert und reproduzierbar. Häufig entsteht zudem eine gewisse Eigendynamik in Verbreitung und Anwendung der zugrunde gelegten Methoden. Aus Sicht einer Fachbehörde des vorsorgenden Bodenschutzes eines Bundeslandes ist es deshalb durchaus geboten zu überprüfen, wie valide dieser Ansatz ist und ob die damit getroffenen Aussagen tatsächlich Grundlage für die Fragestellungen des vorsorgenden Bodenschutzes, insbesondere der Fragen der „Gu-

ten fachlichen Praxis“ (gemäß §17 BBodSchG) sowie des Vollzuges (§12 BBodSchV) sein können.

Aus diesem Grund wurde auf Basis von Literaturdaten das Verfahren des UBA und die dort postulierten Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte bzw. effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung hinsichtlich ihrer statistischen Aussageschärfe und ihrer Reproduzierbarkeit überprüft.

3.1 Erstellung der Datengrundlage zur Validierung der Pedotransferfunktionen

Die Datengrundlage zur Validierung der Methode „Ableitung der Vorbelastung auf Grundlage der Trockenrohdichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld)“ stammt aus 55 Publikationen des Zeitraums 1981 bis 2009 von 32 Erstautoren (s. h. Tabelle 6 sowie die dazugehörige „Literaturliste II – Datengrundlage“). Unveröffentlichte Daten für die Schweiz wurden freundlicherweise von Tobias (Tobias, 2005) zur Verfügung gestellt. Insgesamt handelt es sich um 1494 Angaben zur Vorbelastung (Pv), zu einem sehr großen Teil fanden sich Angaben zur Körnung und Rohdichte. Die effektive Lagerungsdichte (Ld) wurde nach KA5 (Ad-hoc-AG-Boden, 2005) gemäß der Formel $Ld = dB + 0,009 \cdot Ton\%$ für alle Proben einheitlich errechnet. Die Anzahl der Datensätze in den Publikationen reicht von 2 bis 166. Es wurde darauf geachtet, dass Daten, die wiederholt publiziert wurden, nur einmal in die Auswertungsgrundlagen aufgenommen wurden. Trotz größter Sorgfalt kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass sehr wenige Daten von Autoren, die ihre Ergebnisse wiederholt publiziert haben, doppelt aufgenommen wurden.

Die Gruppierung der Daten erfolgte in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe in den Stufen „0 bis 30 cm“, „30 bis 60 cm“, „60 bis 90 cm“ und „> 90 cm“. Lag die aktuelle Bearbeitungstiefe (Ap) aber bei 30 bis 35 cm, wurden die Werte der Gruppe „0 bis 30 cm“ zugeordnet. Gab es Hinweise in der Profilbeschreibung, dass der Boden in 30 bis 35 cm Tiefe bereits einmal mechanisch umgelagert worden war (verlassene Krume), wurden diese Werte ebenfalls der Tiefe „0 bis 30 cm“ zugeordnet.

Zudem müsste bei einer ausgeprägten „verlassenen Krume“ als Krumenbasis bei der Berechnung der Vorbelastung nach DVWK (1995) oder DIN (1998) eher von einem Plattengefuge als einer anderen Gefügeform ausgegan gen werden. Für Plattengefuge werden im DVWK-Merkblatt 234 (1995) für die Kohäsion Werte von 80 bis 100 kPa und für die Winkel der inneren Reibung Werte von 0 bis 700 angeführt. Diese Werte sind, je nach Bodenart, im Vergleich zu den Angaben für die restlichen Gefügeformen um den Faktor 2 bis 10 höher. Aufgrund der hohen Sensitivität dieser beiden Parameter in den PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) könnte somit allein das Gefüge (Plattengefuge ja/nein), d. h. die richtige bzw. ausführliche Beschreibung der Gefügeform, die Klasse der Vorbelastung bestimmen. Da aber die Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens und nicht die mechanische Belastbarkeit der Krumenbasis abgeschätzt werden soll, wurden diese Daten bei der Validierung nicht berücksichtigt. Falls der Ap nur als 25 cm mächtig beschrieben wurde und unterhalb des bearbeiteten Horizontes ein „B“-Horizont mit entsprechendem Gefüge aufgezeigt wurde, erfolgte eine Zuordnung der Werte aus einer Entnahmetiefe von 25 bis 30 cm in die Gruppe „30 bis 60 cm“.

Tabelle 6:

Liste der Publikationen (s. Literaturliste „Datengrundlage“) mit Daten zur Vorbelastung, die zur Validierung genutzt wurden sowie Angaben zur Häufigkeit (n), Mittelwert $\bar{\theta}$ und Extrema (min., max.) in Abhängigkeit von den Entnahmebereichen „0 bis 30 cm“, „30 bis 60 cm“, „60 bis 90 cm“ und „> 90 cm“; Werte, die eine Vorbelastung von 800 kPa überschritten wurden auf 300 kPa „gesetzt“.

Autor	Jahr	Σ	Entnahmebereich der Proben und Angaben zur Vorbelastung in kPa															
			„0 bis 30 cm“				„30 bis 60 cm“				„60 bis 90 cm“				„> 90 cm“			
			n	$\bar{\theta}$	min.	max.	n	$\bar{\theta}$	min.	max.	n	$\bar{\theta}$	min.	max.	n	$\bar{\theta}$	min.	max.
Anken	2003	8	4	56	32	72	4	77	68	91								
Arvidsson	2001	10	5	85	53	120	5	90	56	135								
Anonym	2003	7	4	43	30	58	3	81	67	97								
Arvidsson & Keller	2004	166	46	113	30	287	54	116	35	233	66	142	37	300				
Arvidsson et al.	2001a	3	1	76	----	----	1	82	----	----	1	108	----	----				
Arvidsson et al.	2001b	15	5	81	60	123	5	103	68	165	5	116	69	202				

Fortsetzung Tabelle 6

Fortsetzung Tabelle 6

Autor	Jahr	Σ	Entnahmehbereich der Proben und Angaben zur Vorbelastung in kPa															
			„0 bis 30 cm“				„30 bis 60 cm“				„60 bis 90 cm“				„> 90 cm“			
			n	$\bar{\phi}$	min.	max.	n	$\bar{\phi}$	min.	max.	n	$\bar{\phi}$	min.	max.	n	$\bar{\phi}$	min.	max.
Richter	2005	34	16	59	43	83	9	78	31	212	9	95	46	139				
Rücknagel	2007a	32	22	70	9	159	10	86	46	138								
Rücknagel	2007b	2	2	110	65	155												
Rücknagel et al.	2009	12	6	111	41	200	2	115	43	186	4	106	15	295				
Rüter et al.	1993	12	4	35	21	51	4	90	38	139	4	83	36	130				
Schäfer et al.	2007a	6	3	44	43	46	3	45	42	50								
Schäfer et al.	2007b	12	4	35	33	39					4	35	19	67	4	34	21	54
Schneider	1997	14	6	40	25	55	4	88	44	125	4	100	72	160				
Schwab et al.	2006	4	2	36	29	43	2	69	61	77								
Semmel	1993	123	31	96	15	300	83	131	25	300	9	131	60	200				
Stahl et al.	2005	57	26	83	33	133	31	89	27	157								
Stahl et al.	2009	43	43	63	28	124												
Stock	2005	4	2	42	41	42									2	115	70	160
Tobias	2005	21	12	77	13	200	9	77	17	140								
Trautner & Arvidsson	2003	3					2	160	136	183	1	178	----	----				
Voßbrink	2005	2	1	38	----	----	1	45	----	----								
Weyers	1993	17	6	33	20	49	6	77	23	131	5	67	16	140				
Weyers & Schröder	1991	12	4	49	37	66	4	81	32	126	4	99	27	172				
Wiemann & Warnecke	2003	57	29	51	22	122	28	66	24	150								
Wiermann	1998	136	88	100	20	200	48	129	70	300								
Zink	2009	15	6	46	30	62	7	58	45	75	2	58	53	62				
Zink et al.	2009	6	2	62	58	65	2	104	78	130	2	89	73	104				
Gesamtergebnis		1494	594	78	6	300	673	107	7	300	190	111	10	300	37	48	10	160

Eine ausführliche Übersicht der publizierten Daten, Anzahl für die einzelnen Entnahmehbereiche, die jeweiligen Mittelwerte sowie die zugehörigen Extrema (x_{\min} , x_{\max}) sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

In der Literatur fanden sich Daten für Acker, Grünland und Wald, es wurde zudem unterschieden zwischen Proben aus „gewachsenen“ Böden (g = Boden_(gewachsen)) sowie Proben aus geschütteten, anthropogenen Böden (a = Boden_(anthropogen)) (s. Tabelle 7).

Tabelle 7:

Datengrundlage zur Validierung der Methoden aus der Literatur der Jahre 1981 bis 2009, differenziert nach Bedeckung, Entnahmebereich und der Genese

Entnahmebereich	Anzahl der Datensätze, differenziert nach Bedeckung, Tiefe sowie Genese [anthropogen = aufgetragen („a“) bzw. gewachsen („g“)]							
	Acker		Grünland		Wald		Summe	
	a	g	a	g	a	g	a	g
„0 bis 30 cm“	55	473	2	62	2	57	537	
„30 bis 60 cm“	57	576		27	13	57	616	
„60 bis 90 cm“	48	138		3	1	48	142	
„> 90 cm“	18	17		2		18	19	

Die Spannweite der Werte für die Vorbelastung reicht in der Literatur von 6 bis 800 kPa, für die Auswertung wurden aber alle Daten mit Messwerten größer als 300 kPa auf 300 kPa „gesetzt“. Dies betrifft 26 Datensätze aus 5 Publikationen.

Eine Differenzierung der Werte nach der Methodik der Bestimmung erfolgte nicht. Auch in den neueren Publikationen (Horn et al., 2005), in denen Bodenformen oder Bodenlandschaften Vorbelastungswerte auf Basis von Pedotransferfunktionen zugeordnet werden, war kein Hinweis zu finden, dass hierfür nur Werte zugrunde gelegt wurden, die ausschließlich nach einem Verfahren bestimmt wurden.

Die Spannweite der Daten, differenziert nach der Nutzung zeigt Abbildung 1. Der Median liegt bei ca. 40 kPa für die Standorte unter Wald ($n = 16$), bei ca. 65 kPa für Böden unter Grünlandnutzung ($n = 96$) und bei 85 kPa unter ackerbaulicher Nutzung ($n = 1382$). Die Skalierung der Y-Achse (Vorbelastung (Pv) in kPa) dieser und aller folgenden Abbildungen orientiert sich an den Klassengrenzen, die Lebert & Schäfer (2005) für die Auswertung der Daten für Niedersachsen vorgeschlagen haben und die in der UBA-Studie ebenfalls zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 8:

Anzahl der Datensätze, differenziert nach Bodenartenhauptgruppen gemäß KA5 (Ad hoc AG Boden, 2005) sowie Nutzung und Genese der Böden

Bodenartenhauptgruppen	Anzahl der Datensätze je nach Bodenartenhauptgruppen gewachsen („g“) und anthropogen aufgetragen („a“)								Σ
	Acker		Grünland		Wald		Summe		
	„a“	„g“	„a“	„g“	„a“	„g“	„a“	„g“	
Sande	2	186		8		2	2	196	198
Schluffe	125	483		25		6	125	514	639
Lehme	50	255	2	50		3	52	308	360
Tone	1	279		11		5	1	295	296
Σ	178	1203	2	94		16	180	1313	1493

Für 27 der 31 Bodenartenuntergruppen gemäß Körnungsdreieck nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) liegen Daten vor, es fehlen Daten für den St3 sowie für die sandigen Tone (Ts2, Ts3 und Ts4). Die Anteile an Sand reichen von 1 bis 99 %, für Schluff von 0,1 bis 90 % und für Ton von 0 bis 86 %. Die Werte für die Trockenrohdichte liegen zwischen 0,45 und 1,95 g/cm³, die Werte für die effektive Lagerungsdichte zwischen 0,64 und 2,258.

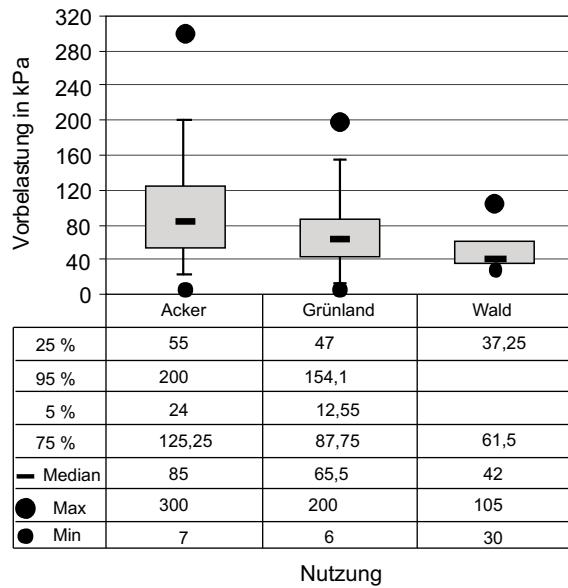


Abbildung 1:

Box Whisker Plot der Daten der Vorbelastung (in kPa), differenziert nach der Art der Nutzung

Die Aufteilung der Daten nach Bodenartenhauptgruppen der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) zeigt Tabelle 8.

Mit mehr als 40 % der Proben ist die Gruppe der Schluffe im Vergleich zu den anderen Gruppen sehr stark vertreten, die Sande mit nur 13 % hingegen sehr schwach. Von den ca. 1200 Proben der Gruppe „Acker_(gewachsen)“ gehören 570

Tabelle 9:

Anzahl der Datensätze (n) sowie die durchschnittliche Vorbelastung (Pv) für den Bereich „30 bis 60 cm“ unter ackerbaulicher Nutzung für 11 Bodenartengruppen bzw. 26 Bodenartenuntergruppen.

Anzahl und Mittelwert der Vorbelastung (Pv)			
Bodenartengruppen	Bodenartenuntergruppen	n	Ø Pv in kPa
ss - Reinsande	Ss	19	195
	Σ	19	195
ls - Lehmsande	Sl2	32	95
	Sl3	15	109
	St2	2	125
	Su2	11	89
	Σ	60	98
us - Schluffsande	Su3	3	100
	Su4	2	170
	Σ	5	128
su - Sandschluffe	Uu	3	100
	Σ	3	100
lu - Lehmschluffe	Uls	8	134
	Ut2	38	127
	Ut3	83	137
	Σ	129	134
tu - Tonschluffe	Lu	25	99
	Ut4	82	101
	Σ	107	100
sl - Sandlehme	Sl4	43	89
	Slu	5	106
	Σ	48	91
ll - Normallehme	Ls2	7	81
	Ls3	23	86
	Ls4	10	82
	Lt2	39	89
	Σ	79	87
tl - Tonlehme	Lts	4	78
	Σ	4	78
ut - Schlufftome	Lt3	23	97
	Tu3	33	114
	Tu4	9	95
	Σ	65	105
lt - Lehmtome	Tl	13	99
	Tt	12	114
	Tu2	32	127
	Σ	57	118

zu nur sieben im Körnungsdreieck der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) zudem direkt benachbarten Bodenartenuntergruppen. Es handelt sich um den Uls, Lu, Tu3, Tu4, Ut2, Ut3 und den Ut4. Allein 154 gehören davon wiederum zum Ut3. Jeweils mehr als 50 Datensätze gibt es noch für den Lt2, Sl4, Sl2 und den Tu2. Mit insgesamt 865 von 1200 Datensätzen gehören mehr als 70 % der Daten zu nur 11 der insgesamt 27 beprobten Bodenartenuntergruppen bzw.

der 31 möglichen Bodenartenuntergruppen nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Somit liegen für den größten Teil der bundesweit vorzufindenden Bodenarten-untergruppen, nämlich 20 von 31, viel zu wenig Messwerte vor. Dies ist im Hinblick auf die Repräsentativität bzw. Aussagekraft einer bundesweiten Darstellung unbedingt zu berücksichtigen.

Die Karte der Verdichtungsempfindlichkeit gilt nur für den Bereich des Unterbodens von Standorten unter ackerbaulicher Nutzung. Auf die Verdichtungswirkung durch die (landwirtschaftliche) Bodennutzung bis in eine Tiefe von 60 cm (Unterboden), aber auch darüber hinaus, wird schon seit Jahren in einer Vielzahl von Publikationen hingewiesen (zB. Kuntze, 1986; Hakansson et al., 1987; Fenner, 1997; Horn & Hartge, 2001). Für die Validierung der Methoden wird die Grundgesamtheit der Daten deshalb reduziert auf „Acker^(gewachsen)“ (Gültigkeitsbereich der Karte) und eine „kritische“ Tiefe von „30 bis 60 cm“. Dadurch verringert sich die Zahl der Datensätze mit Angaben zur Vorbelastung auf 576 (s. Tabelle 9).

Analog zur Grundgesamtheit der Daten sind auch hier wieder einige Bodenartenuntergruppen sehr stark vertreten, das gilt für Ut2, Ut3, Ut4, Tu2, Tu3 und Lt2, die mit 339 Datensätzen fast 60 % der Datengrundlage bilden. Im Vergleich zu den 180 Datensätzen der UBA-Studie konnte die zur Verfügung stehende *Messdatengrundlage* verdreifacht werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die für die UBA-Studie genutzten Daten zu einem großen Teil aus den gleichen Quellen stammen wie die hier ausgewerteten Daten.

3.2 Validierung der Pedotransferfunktionen

In Anlehnung an die oben dargestellte schrittweise Herleitung der Transferfunktionen erfolgt die Validierung entsprechend in fünf Schritten:

- 1.) Darstellung des Zusammenhangs zwischen Trockenrohdichte (dB) bzw. effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung_(gemessen), getrennt für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen,
- 2.) Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung nach den von Lebert (2008) verifizierten Regressionen aus DVWK 234 (1995) und DIN-V-19688 (1998),
- 3.) Darstellung des Zusammenhangs zwischen effektiver Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) geschätzten Werte der Vorbelastung getrennt für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen,
- 4.) Darstellung des Zusammenhangs zwischen Ld und Vorbelastung auf Basis der Regressionen der Tabelle 4 für die 11 Bodenartengruppen,
- 5.) Berechnung der Gütekriterien zur Beurteilung der Qualität der mittels PTF berechneten Schätzdaten.

3.2.1 Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte (dB) bzw. effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung_(gemessen)

Die folgende Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte (dB) und Vorbelastung. Die Gruppierung der Bodenartenhauptgruppen erfolgt nach den Vorgaben der UBA-Studie (Lebert, 2008). Nicht für alle Horizonte mit Angaben zur Vorbelastung wurden auch die Werte der Rohdichte, resp. der effektiven Lagerungsdichte publiziert, deshalb reduzierte sich die Anzahl der Wertepaare für die Regressionsberechnungen von 576 auf 487.

In der folgenden Tabelle 10 finden sich die statistischen Angaben der zugehörigen Ausgleichsgeraden.

Die geringen Bestimmtheitsmaße sind Ausdruck der großen Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade. Ein statistisch belegbarer Zusammenhang ist nicht zu erkennen. Letztendlich handelt es sich nur um Trends einer Zunahme der Vorbelastung mit zunehmender Trockenrohdichte. Belastbare Transferfunktionen lassen sich bei einem Bestimmtheitsmaß von 1 bis 11 % nicht ableiten.

Tabelle 10:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte (x) und Vorbelastung_(gemessen) (y) bei einer Wasserspannung von pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß Lebert (2008) (n = 487)

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmt-heitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hoch- Prozentig“	42	R ² = 0,1119	y = 216,54 x - 177,17
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	66	R ² = 0,0267	y = 47,87 x + 25,01
Schluffe	236	R ² = 0,1067	y = 271,02 x - 291,42
Lehme	64	R ² = 0,0134	y = 17,54 x + 62,53
Tone	79	R ² = 0,1027	y = 91,31 x - 21,19

In Abbildung 3 wird der Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung dargestellt. Hier werden alle Daten gemeinsam betrachtet, da die Ld definitionsgemäß einen Vergleich über alle Bodenartenuntergruppen hinweg erlauben soll, was für die Trockenrohdichte bekanntermaßen nicht möglich ist. Auch in diesem Fall ist ein statistisch absicherbarer Zusammenhang (R² = 0,0063) nicht zu erkennen.

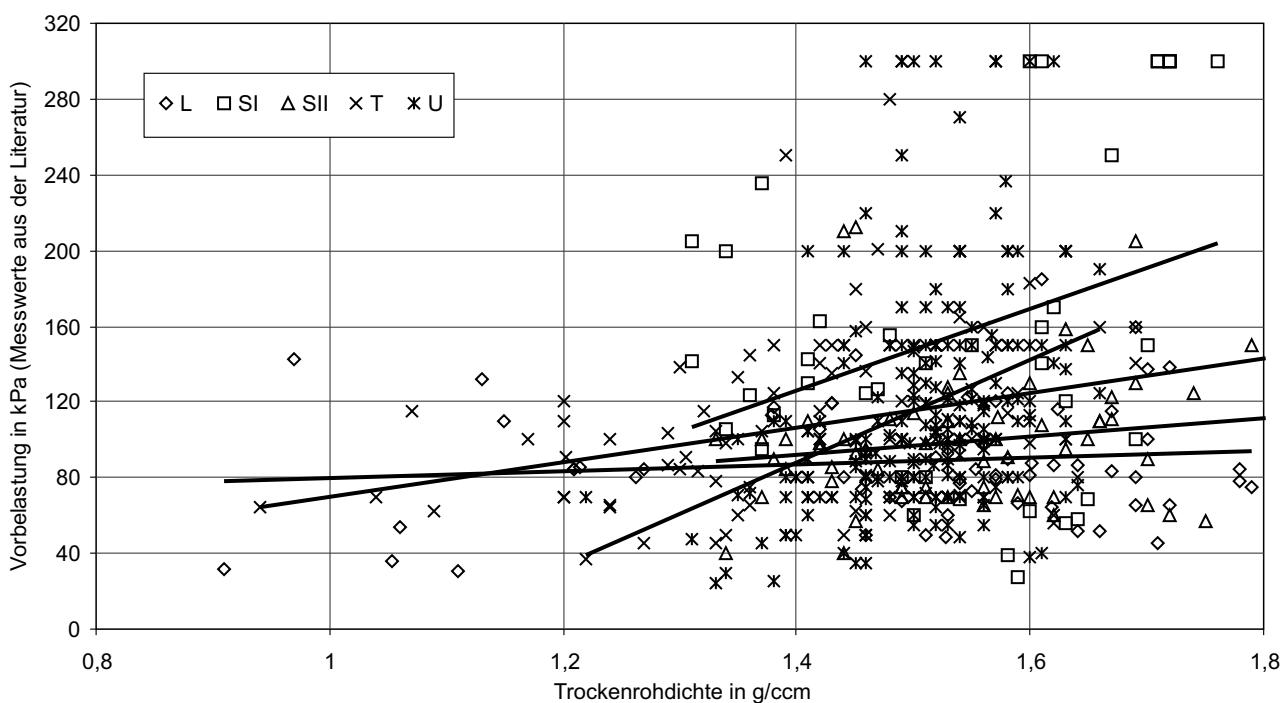


Abbildung 2:

Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung, differenziert in die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) für Messdaten aus der Literatur (ingesamt = 487)

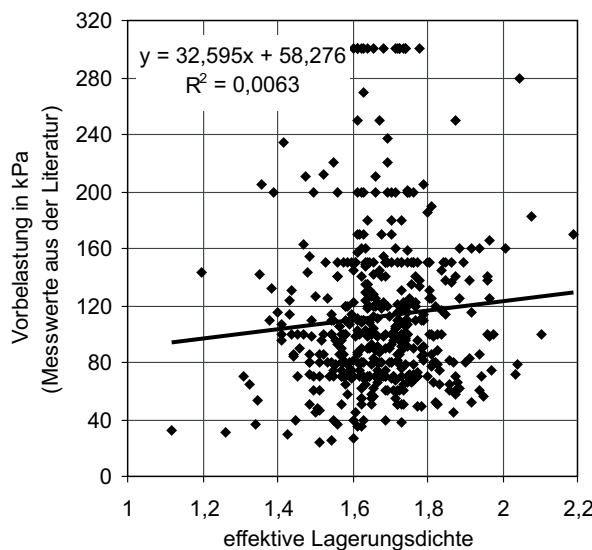


Abbildung 3:

Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und Vorbelastung für die Messdaten aus der Literatur ($n = 487$)

Auch eine Gruppierung in die fünf Bodenartenhauptgruppen ergibt keinen statistisch absicherbaren Zusammenhang zwischen Ld und den Messwerten der Vorbelastung (s. Tabelle 11), im Vergleich zu den Ergebnissen der Tabelle 10 sind die Bestimmtheitsmaße sogar noch geringer.

Tabelle 11:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte (Ld) und gemessener Vorbelastung (Pv) bei pF 1,8 für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß Lebert (2008) ($n = 487$).

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmt- heitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hoch- prozentig“	42	$R^2 = 0,0889$	$y = 213,22 x - 178,91$
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	66	$R^2 = 0,0073$	$y = 24,17 x + 59,01$
Schluffe	236	$R^2 = 0,0277$	$y = 121,61 x - 83,44$
Lehme	64	$R^2 = 0,0092$	$y = 15,01 x + 62,99$
Tone	79	$R^2 = 0,1560$	$y = 122,08 x - 10,35$

Theoretische und rechnerische Grundlage für die Ableitung der Pedotransferfunktionen in der UBA-Studie ist der dort formulierte Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung. Der Versuch, diesen Sachverhalt mittels einer Auswertung der Daten aus der Fachliteratur zu reproduzieren, hat gezeigt, dass der den Pedotransferfunktionen der UBA-Studie zugrunde gelegte Zusammenhang nicht vorhanden bzw. nicht mit der für die Ableitung einer Pedotransferfunktion nötigen statistischen Sicherheit verifizierbar ist.

3.2.2 Ableitung der Schätzwerte der Vorbelastung nach den von Lebert (2008) verifizierten Regressionen aus DVWK 234 (1995) und DIN-V-19688 (1998).

Im Rahmen der Studie für das UBA verifizierte Lebert (2008) die vom DVWK (1995) sowie DIN (1998) publizierten Pedotransferfunktionen (PTF), um die Datenbasis an Werten der Vorbelastung zu erweitern und damit eine Grundlage für eine bundesweit gültige Aussage zu schaffen.

Die als plausibel beurteilten PTF für die Texturgruppe der „hochprozentigen Sande“ stammen aus dem DVWK Merkblatt 234 (1995), für die vier übrigen Texturgruppen werden die PTF der DIN-V-19688 (1998) als geeignet bewertet. Die PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) benötigen zwischen vier und acht Parameter, wie z. B. die Luftkapazität (LK), die nutzbare Feldkapazität (nFK). Für 394 der bisher genutzten Datensätze waren Angaben zur LK und nFK den Publikationen zu entnehmen. Die Parameter „Kohäsion“ („C“) und „Winkel der inneren Reibung“ („phi“) fehlten z. T. in den Publikationen. Da die publizierten Werte für „C“ und „phi“ teilweise deutlich von den Tabellenwerten der DIN (1998) bzw. des DVWK (1995) abweichen, wurden für alle zur Validierung genutzten Datensätze dem beschriebenen Gefüge entsprechende Tabellenwerte der DIN (1998) in die PTF eingesetzt. Fehlten in der jeweiligen Publikation die Angaben zum Gefüge wurden die Tabellenwerte für ein Subpolyedergefüge eingesetzt. Fehlten in der Literatur hingegen die Angaben zur LK oder nFK wurden diese nicht ergänzt, auf diese Datensätze wurde bei der Ableitung der Schätzwerte verzichtet.

Die Tabelle 12 zeigt die Mittelwerte der Vorbelastung, geschätzt nach den PTF aus DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die nunmehr 394 verfügbaren Datensätze.

Aus ihr wird deutlich, dass der größte Teil der Mittelwerte für die Vorbelastung_(geschätzt) unabhängig von der Hauptbodenart, den Bodenartengruppen bzw. -untergruppen, zwischen 80 und 120 kPa liegt. Eine bodenartspezifische Differenzierung ist somit nicht zu erkennen.

Tabelle 12:

Mittelwerte der nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) geschätzten Vorbelastungen für die Bodenartengruppen sowie die 26 Bodenartenuntergruppen auf Basis der Daten aus der Literatur (1981 bis 2009)

Bodenarten- gruppen	Bodenarten- untergruppen	n	$\bar{\phi} P_v$ in kPa geschätzt nach DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998)
ss - Reinsande	Ss	19	182
	Σ	19	182
ls - Lehmsande	Sl2	13	58
	Sl3	9	100
	St2	2	121
	Su2	8	105
	Σ	32	86
us - Schliffsande	Su3	3	88
	Su4	1	142
	Σ	4	102
su - Sandschluffe	Uu	-	---
	Σ	-	---
lu - Lehmschluffe	Uls	8	150
	Ut2	26	105
	Ut3	66	107
	Σ	100	110
tu - Tonschluffe	Lu	25	84
	Ut4	54	81
	Σ	79	82
sl - Sandlehme	Sl4	39	98
	Slu	5	116
	Σ	44	100
ll - Normallehme	Ls2	5	64
	Ls3	13	105
	Ls4	5	105
	Lt2	20	74
	Σ	43	86
tl - Tonlehme	Lts	4	85
	Σ	4	85
ut - Schlufftone	Lt3	17	87
	Tu3	23	81
	Tu4	9	101
	Σ	49	87
lt - Lehmtonne	Tl	5	94
	Tt	1	91
	Tu2	14	109
	Σ	20	104

3.3.3 Darstellung des Zusammenhangs zwischen effektiver Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) geschätzten Werten der Vorbelastung differenziert für die fünf von Lebert (2008) definierten Bodenartenhauptgruppen

Analog zu der Vorgehensweise von Lebert (2008) wird im Folgenden zunächst der statistische Zusammenhang zwischen der effektiven Lagerungsdichte bzw. der Rohdichte und den nach DVWK (1995) bzw. DIN (1998) im vorherigen Abschnitt abgeleiteten Schätzwerten der Vorbelastung ermittelt.

Der Zusammenhang zwischen der effektiven Lagerungsdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung, differenziert für die fünf Bodenartenhauptgruppen, wird in Abbildung 4 dargestellt.

In der Tabelle 13 finden sich die zugehörigen statistischen Angaben der Ausgleichsgeraden.

Tabelle 13:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen effektiver Lagerungsdichte und geschätzter Vorbelastung bei einer Wasserspannung von $p_f = 1,8$ gemäß DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die fünf Bodenartenhauptgruppen

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hoch- prozentig“	42	$R^2 = 0,8258$	$y = 583,02 x - 792,25$
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	57	$R^2 = 0,4031$	$y = 108,74 x - 77,75$
Schluffe	179	$R^2 = 0,0519$	$y = 81,73 x - 38,19$
Lehme	47	$R^2 = 0,6483$	$y = 122,77 x - 123,43$
Tone	69	$R^2 = 0,1337$	$y = 56,31 x - 8,56$

Vergleicht man die Angaben in Tabelle 13 mit den Angaben in der Tabelle 11, dann ergeben sich für die Bodenartenhauptgruppen Sande (I) und Sande (II) sowie Lehme deutlich bessere Bestimmtheitsmaße für die Schätzdaten als für die gemessenen Werte. Ursache hierfür dürfte vor allem die große Sensitivität der Trockenrohdichte und damit natürlich auch der L_d in den PTF sein. So sind die Bestimmtheitsmaße für die Regressionsgeraden zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung ($\text{Vorbelastung}_{\text{geschätzt}}$) im Vergleich zu den Regressionsgeraden der gemessenen Werte deutlich besser (s. Abbildung 5 und Tabelle 14).

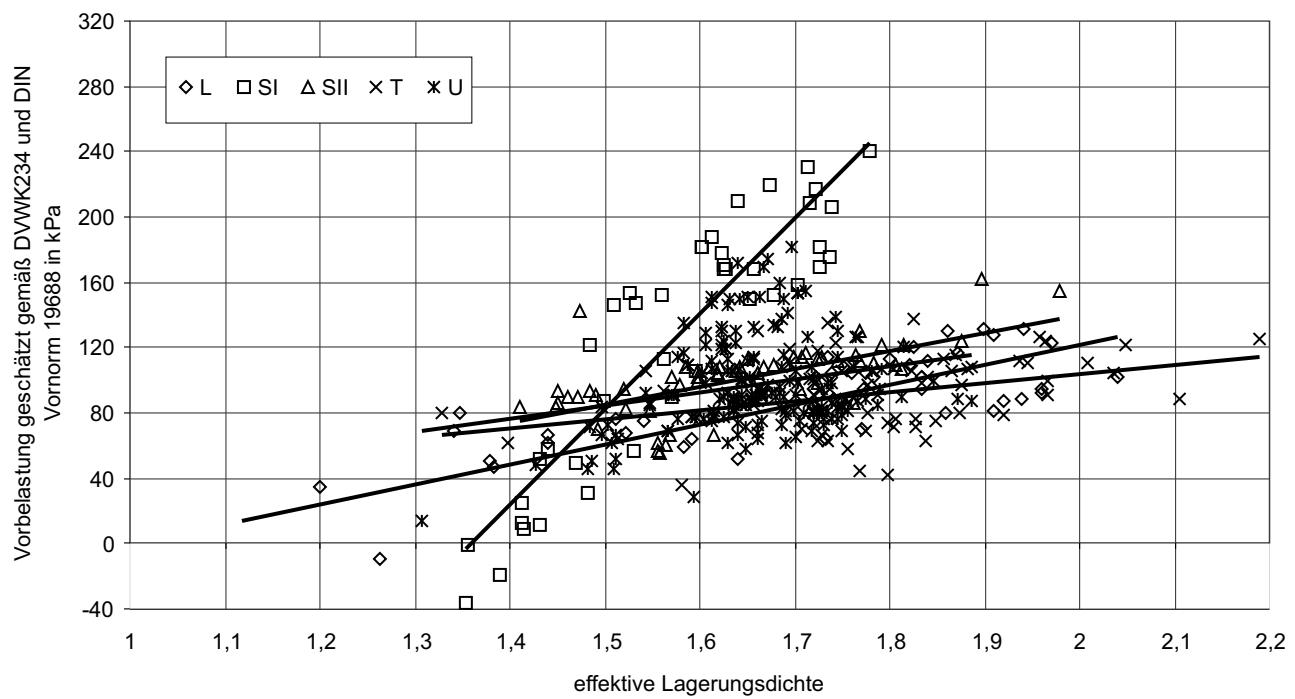


Abbildung 4:

Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte (geschätzt nach DVWK (1995) und DIN (1998)) und Vorbelastung, differenziert in die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008) für die Messdaten aus der Literatur ($n = 394$)

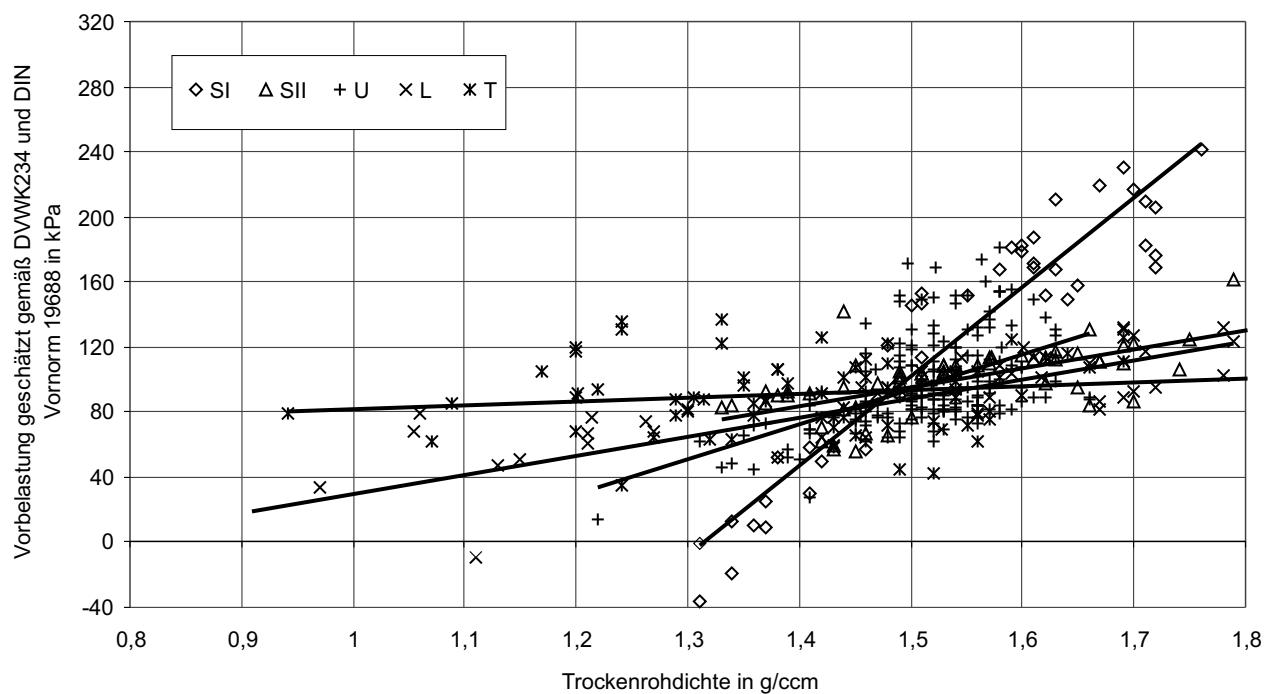


Abbildung 5:

Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt), differenziert in die fünf Bodenarthauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008), geschätzt auf Basis der Messdaten aus der Literatur ($n = 394$)

Tabelle 14:

Regressionsgeraden der Trends für die Zusammenhänge zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt) bei einer Wasserspannung von pF 1,8 gemäß DVWK 234 (1995) bzw. DIN-V-19688 (1998) für die fünf Bodenartenhauptgruppen, geschätzt auf Basis der Messdaten aus der Literatur ($n = 394$)

Bodenartenhauptgruppe	Anzahl	Bestimmt- heitsmaß	Regressionsgerade
Sande (I) – „hoch- prozentig“	42	$R^2 = 0,8914$	$y = 548,95 x - 721,12$
Sande (II) – mit „höheren Beimischungen“ an Ton und Schluff	57	$R^2 = 0,4431$	$y = 116,13 x - 78,35$
Schluffe	179	$R^2 = 0,2602$	$y = 215,59 x - 229,05$
Lehme	47	$R^2 = 0,6484$	$y = 118,30 x - 89,16$
Tone	69	$R^2 = 0,0278$	$y = 23,612 x + 58,53$

Die höheren Bestimmtheitsmaße relativieren sich allerdings deutlich, wenn man den Zusammenhang zwischen Vorbelastung_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) betrachtet (s. Abbildung 6).

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die nach DVWK (1995) und DIN (1998) geschätzten Werte mit den Messwerten nicht in Übereinstimmung sind. Ab einer gemessenen Vorbelastung von ca. 80 kPa, dies entspricht der Klasse „mittel“ nach Lebert & Schäfer (2005), ist davon auszugehen, dass die PTF nach DVWK (1995) bzw. DIN

(1998) eher unterschätzen. Unterhalb der Messwerte von 80 kPa ist eher eine Überschätzung zu erkennen. In der „Philosophie“ der Vorbelastung bedeutet dies, dass eine Schätzung nach DVWK (1995) und DIN (1998) die tatsächliche Tragfähigkeit der Unterböden unterschätzen würde. Für Unterböden mit einer höheren Vorbelastung würden somit nur noch geringere zusätzliche Lasteinträge als tatsächlich kompensierbar als akzeptabel angesehen. Auf Böden mit tatsächlich geringen Vorbelastungswerten würde sie hingegen überschätzt. Durch eine auf diese Schätzwerte abgestimmte Nutzung könnte es im letzten Fall dann zu einer zusätzlichen irreversiblen Verdichtung kommen. Gleiches wäre bei einer entsprechenden „tolierbaren Belastung“ nicht auszuschließen.

Da aber keine eindeutige Tendenz einer Über- oder Unterschätzung zu belegen ist, bedeutet es letztendlich nur, dass auf Basis der nach DVWK (1995) und DIN-V-19688 (1998) abgeleiteten Schätzwerte eine fundierte Empfehlung zu kompensierbaren Lasteinträgen nicht möglich ist.

3.3.4 Darstellung des Zusammenhangs zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung auf Basis der von Lebert (2008) ermittelten Regressionen für die 11 Bodenartengruppen

Durch die Erweiterung des Datensatzes im Vergleich zu DVWK 234 bzw. DIN-V-19688 konnte Lebert (2008) die

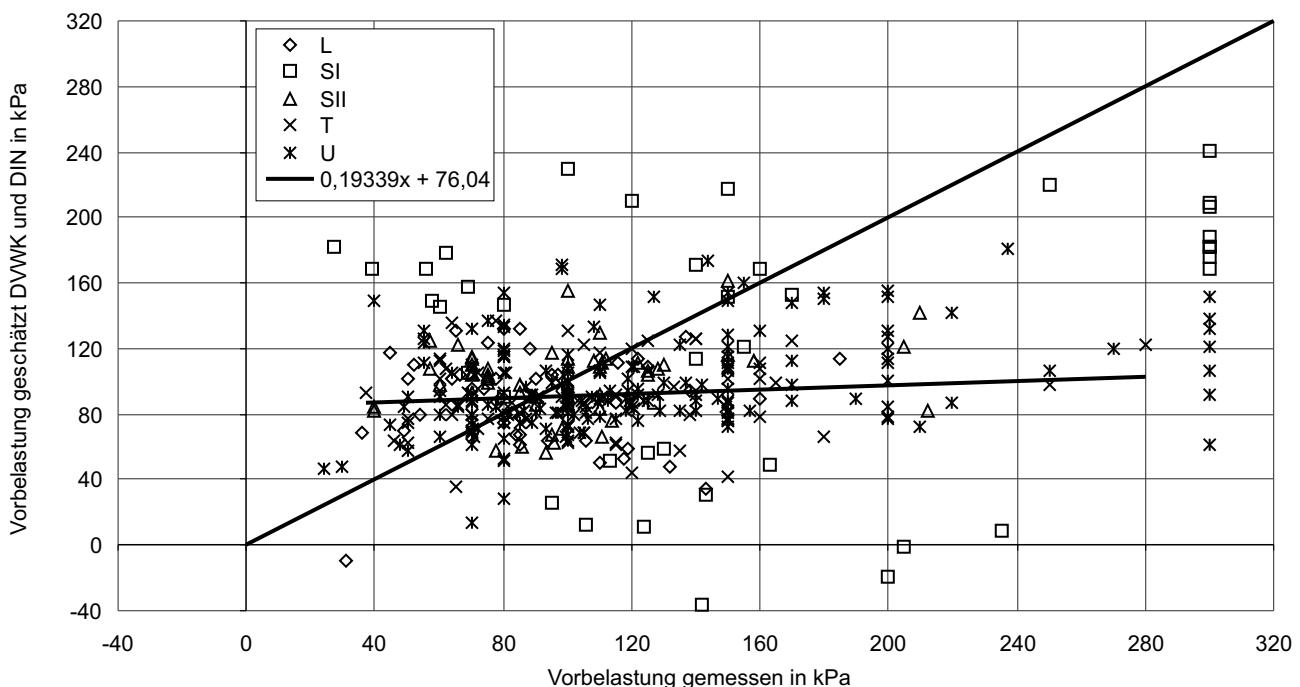


Abbildung 6:

„1 : 1“- Streudiagramm – Vorbelastung_(gemessen) gegen Vorbelastung_(geschätzt) – differenziert dargestellt für die fünf Bodenartenhauptgruppen gemäß UBA-Studie (Lebert, 2008), geschätzt auf Basis der Daten aus der Literatur ($n = 394$, $y = 0,19339x + 76,04$; $R^2 = 0,0892$).

erwähnten statistischen Zusammenhänge nicht nur für die fünf Hauptbodenartengruppen berechnen, sondern den Datensatz weiter untergliedern und damit diese Beziehungen auch für die 11 Bodenartengruppen der KA5 bestimmen (s. Tabelle 4).

Für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) werden im Folgenden, analog zur Vorgehensweise von Lebert (2008), beispielhaft die gleichen Zusammenhänge für die Daten aus der Literatur aufgezeigt.

So zeigt Abbildung 7 den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DIN-V-19688 (1998) auf Basis der Messdaten aus der Literatur.

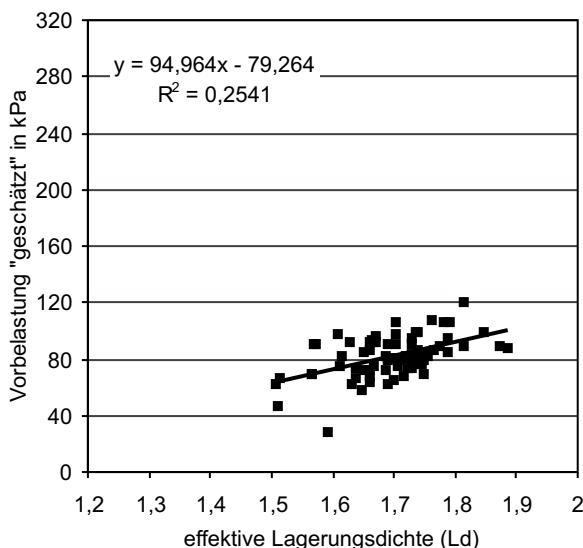


Abbildung 7:
Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung_(geschätzt) nach DIN-V-19688 (1998) für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten aus der Literatur ($n = 79$)

Vergleicht man die Schätzwerte nach DIN-V-19688 (1998) mit den tatsächlich gemessenen Werten, so zeigt sich erneut, wie locker der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen ist und dass nur für den Bereich einer Vorbelastung von 80 bis 120 kPa ein tendenzieller Zusammenhang erkennbar ist (s. Abbildung 8).

Die Vorbelastung ist für die Gruppe der Tonschluffe aus der effektiven Lagerungsdichte regressionsanalytisch bei einem Bestimmtheitsmaß von ca. 25 % nicht ableitbar. Ab einer mittleren Vorbelastung (> 120 kPa) kommt es bei der Nutzung der PTF eher zu einer Unterschätzung, für den Bereich der geringen Vorbelastung (< 80 kPa) eher zu einer Überschätzung.

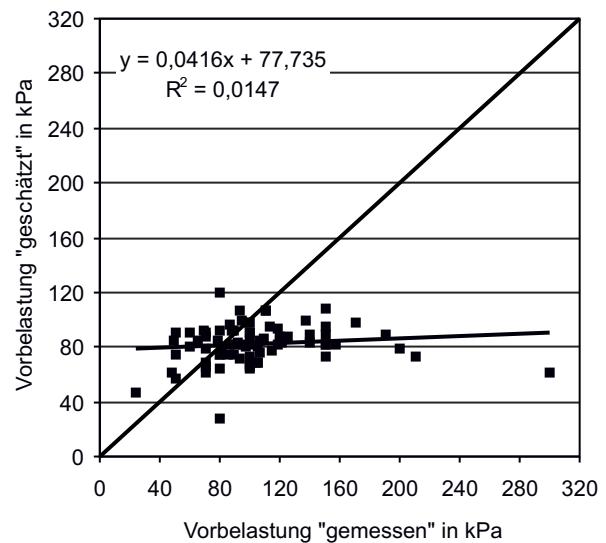


Abbildung 8:

„1 : 1“- Streudiagramm für den Zusammenhang: Vorbelastung_(gemessen) gegen Vorbelastung_(geschätzt) geschätzt nach DIN-V-19688 (1998) für die Bodenartengruppe Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten ($n = 79$).

Errechnet man zum Vergleich die Vorbelastung auf Basis der in der UBA-Studie ermittelten Regression für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung ($y = 125,72 x - 128,36$, s. Tabelle 4) und stellt die so errechneten Werte den Messwerten gegenüber, dann zeigt sich Folgendes (s. Abbildung 9).

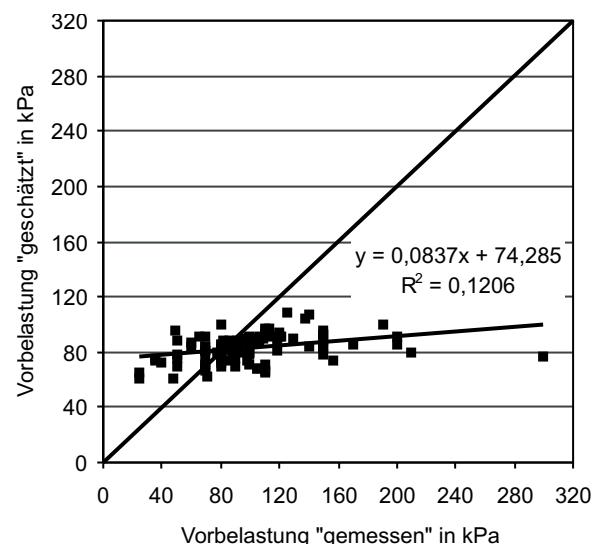


Abbildung 9:

„1 : 1“- Streudiagramm für den Zusammenhang zwischen Vorbelastung_(gemessen) und Vorbelastung_(geschätzt) [Schätzung nach der Regression aus Lebert (2008)] für die Bodenartengruppe der Tonschluffe („tu“) auf Basis der Messdaten aus der Literatur ($n = 106$)

Auch hier ist deutlich zu erkennen, wie stark die Schätzwerte von den gemessenen Werten abweichen. Das mit 12 % etwas bessere Bestimmtheitsmaß (im Vgl. zu Abbil-

dung 8) wird vor allem durch die geringere Streuung der Schätzwerte bestimmt und ist kein Ausdruck eines statistisch belastbareren Zusammenhangs.

Entsprechend der in Tabelle 5 beispielhaft beschriebenen Herangehensweise berechnete Lebert (2008) für alle 11 Bodenartengruppen die Regressionsgeraden für den Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung_(geschätzt), dann für alle 11 Bodenartengruppen für die jeweils fünf Klassenmittelwerte der Ld die zugehörige Vorbelastung. Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug seiner Ergebnisse für die Bodenartengruppen Lehmschluffe „lu“, Tonschluffe „tu“, Normallehme „ll“ und Schlufftome „ut“.

Tabelle 15:

Mittelwerte der von Lebert (2008) regressionsanalytisch abgeleiteten Schätzwerte der Vorbelastung (kPa) für vier Bodenartengruppen, differenziert nach effektiver Lagerungsdichte (Ld) der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Bodenarten-gruppe	Klasse der effektiven Lagerungsdichte (Ld) nach KA5				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	63	98	133	157	--
„tu“	35	60	85	111	129
„ll“	35	61	87	113	132
„ut“	54	70	87	104	116

Es fällt auf, dass für die Werte der Gruppen „tu“ und „ll“, die zwei unterschiedlichen Bodenartenhauptgruppen angehören, für die Klassen der Ld 1 bis Ld 5 kein Unterschied in der Höhe der errechneten Vorbelastung zu erkennen ist. Für die Gruppen „tu“, „ll“ und „ut“ ist für die Klasse Ld 3 ebenfalls kein Unterschied zu erkennen.

Vergleicht man die Werte (Tabelle 15) mit entsprechenden Werten der Messwerte aus der Literatur (s. Tabelle 16), so sind aber sehr wohl Unterschiede zwischen den einzelnen Bodenartengruppen zu erkennen. Besonders für die Gruppe „ll“ wird ersichtlich, dass der postulierte Zusammenhang zwischen Ld und Vorbelastung nicht vorhanden ist. Das ist im Einklang mit dem in Abbildung 2 dargestellten Sachverhalt.

Tabelle 16:

Mittelwerte der Messwerte der Vorbelastung für vier Bodenartengruppen, differenziert nach den Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Ld) der KA5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005)

Bodenarten-gruppe	Klasse der effektiven Lagerungsdichte Ld				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	70	105	141	---	---
„tu“	---	77	103	134	---
„ll“	80	102	90	90	78
„ut“	90	65	101	111	165

Klassifiziert man nun aber die Mittelwerte gemäß der Klassenbildung von Lebert & Schäfer (2005), so erhält man, bis auf wenige Ausnahmen (in der Tabelle 17 fett-kursiv), für die Schätzdaten nach Lebert (2008), verglichen mit den Messdaten aus der Literatur, eine identische Klasseneinteilung. Da nun den Legendeneinheiten der Bodenkarten nicht die absoluten Werte, sondern die Klassen der Vorbelastung zugeordnet werden und diese Klassen bei Schätz- und Messwerten nahezu identisch sind, werden mit den beiden Tabellen (s. Tabellen 17 und 18) die Ergebnisse der UBA-Studie anscheinend bestätigt, obwohl es, wie bereits aufgezeigt nur unbefriedigende, d. h. statistisch nicht belegbare Zusammenhänge gibt.

Tabelle 17:

Klassen der Mittelwerte der Schätzwerte (oben) und der Messwerte (unten) der Vorbelastung, differenziert nach den Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Ld); „fett-kursiv“ keine Übereinstimmung.

Bodenarten-gruppe	Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit aus LEBERT (2008)				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	5	4	3	3	(2)
„tu“	6	5	4	4	3
„ll“	6	5	4	4	3
„ut“	5	5	4	4	4

Bodenarten-gruppe	Klasse der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit auf Basis der Messwerte aus der Literatur				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	5	4	3	---	---
„tu“	---	5	4	4	---
„ll“	5	4	4	4	5
„ut“	5	5	4	4	2

Betrachtet man nochmals die bereits ausführlich dargestellten unbefriedigenden statistischen Zusammenhänge, insbesondere die große Streuung der Messwerte, dann bedarf es einer genaueren Darstellung der statistischen Parameter, der der Tabelle der Messwerte zugrunde liegenden Mittelwerte. In der Tabelle 18 sind die Streuung und die Variationskoeffizienten der Mittelwerte für die vier beispielhaft angeführten Bodenartengruppen angeführt. Die Mittelwerte sind gekennzeichnet durch eine hohe Streuung, häufig bis zu einer Klassenbreite von 40 kPa sowie durch Variationskoeffizienten von bis zu 60 %. Bei einer so großen Streuung bedeutet dies bei einer Darstellung in Form einer Karte, dass in der zugehörigen Legende bzw. Erläuterung dem Nutzer unbedingt vermittelt werden müssen, dass die dargestellten Klassen um jeweils ½ bis 1 Klassenbreite unter- oder überschritten werden können, die Spanne der Vorbelastung für die einzelnen Legendeneinheiten somit jeweils ca. zwei wenn nicht sogar drei Klassen betragen kann.

Tabelle 18:

Standardabweichung (oben) bzw. Variationskoeffizienten (unten) der Mittelwerte der Messdaten für die 4 Bodenartengruppen „lu“, „tu“, „ll“ und „ut“.

Bodenarten-gruppe	Streuung der Messwerte in kPa				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	48	68			
„tu“	28	42	39		
„ll“	50	16	32	31	5
„ut“	36	25	39	38	7
Bodenarten-gruppe	Variationskoeffizient der Messwerte in %				
	Ld 1	Ld 2	Ld 3	Ld 4	Ld 5
„lu“	45,4	48,0			
„tu“	35,7	40,8	29,2		
„ll“	59,2	16,2	35,7	34,5	
„ut“	40,3	38,6	38,1	34,0	4,3

Tabelle 19:

Die „mittleren Fehler“ (ME) sowie die „Quadratwurzelfehler“ (RMSE) als Gütekriterien für unterschiedliche Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung

A: für die Pedotransferfunktionen nach DVWK 234 (1995), DIN-V-19688 (1998)

B_1: für die Pedotransferfunktionen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) – Ableitung der Vorbelastung auf Basis der Trockenrohdichte für alle Proben sowie getrennt nach den Bodenartenhauptgruppen nach Lebert (2008)

B_2: für die Pedotransferfunktionen gemäß der UBA-Studie (Lebert, 2008) – Ableitung der Vorbelastung auf Basis der effektiven Lagerungsdichte (Ld) für alle Proben getrennt nach den Bodenartengruppen „lu“, „tu“, „ut“, „sl“, „ll“ und „ls“.

Variante	n	Spannweite der Differenz Schätzwert / Messwert in kPa	ME	RMSE in kPa
A: DVWK (1995), DIN (1998)				
Grundgesamtheit	394	-238 bis + 154	-16,54	61,59
DVWK 1995 (Sande I + II)	42	-225 bis + 154	-27,45	107,68
DIN-V-19688 (1998) Schluffe	118	-208 bis + 112	-23,24	66,41
DIN-V-19688 (1998) Lehme	150	-238 bis + 94	-7,40	43,21
DIN-V-19688 (1998) Tone	84	-158 bis + 71	17,6	49,15
B_1: LEBERT (2008) Basis: Trockenrohdichte				
alle Bodenartenhauptgruppen	486	-202 bis + 135	-8,07	54,87
Bodenartenhauptgruppe: Sande I	41	-172 bis + 135	-15,54	87,73
Bodenartenhauptgruppe: Sande II	66	-65 bis + 128	1,84	35,61
Bodenartenhauptgruppe: Schluffe	236	-202 bis + 126	8,96	57,82
Bodenartenhauptgruppe: Lehme	64	-120 bis + 92	-0,76	39,12
Bodenartenhauptgruppe: Tone	79	-52 bis + 180	12,93	45,70
B_2: LEBERT (2008) Basis: eff. Lagerungsdichte				
Bodenartengruppe: „lu“	130	-182 bis + 140	-7,37	66,68
Bodenartengruppe: „tu“	106	-228 bis + 68	-15,45	42,87
Bodenartengruppe: „ut“	54	-109 bis + 51	-13,10	39,65
Bodenartengruppe: „sl“	61	-132 bis + 66	-1,48	33,61
Bodenartengruppe: „ll“	60	-120 bis + 89	+1,31	40,57
Bodenartengruppe: „ls“	23	-192 bis + 105	-29,54	94,75

Hier besteht somit die Gefahr einer großen Fehleinschätzung, da die Matrix letztendlich auch nur das Ergebnis einer Schätzung ist und der für diese Schätzung postulierte Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung statistisch nicht nachweisbar bzw. mangels ausreichender Datengrundlage für belastbare Aussagen nicht hinreichend genau absicherbar ist. Zudem konnte für keine Gruppe der Daten ein Zusammenhang zwischen den geschätzten und den gemessenen Daten aufgezeigt werden. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die durch Messwerte nicht validierbaren Bewertungen der Schätztabellen ohne die Darstellung der Aussagegenauigkeit (± 1 bis 2 Klassen) in Form einer Karte nicht hätten publiziert werden sollen.

3.3.5. Berechnung der Gütekriterien zur Beurteilung der Qualität der mittels Pedotransferfunktionen berechneten Schätzdaten

Die Genauigkeit, mit der die mittels Pedotransferfunktionen berechneten Zielwerte (Vorbelastung_(geschätzt)) mit den entsprechenden Messwerten (Vorbelastung_(gemessen)) übereinstimmen, kann über verschiedene Kriterien beschrieben werden (Willmott, 1982; Robinson et al., 2005; Cornelius et al., 2001). Informationen zur generellen Richtung der Abweichung (Über- oder Unterschätzung) liefert der „mittlere Fehler“ ME = $(\sum(y_{\text{ges}} - y_{\text{gem}})/N)$.

Die Qualität der Aussagegenauigkeit einer Schätzung beschreibt als Gütekriterium der so genannte „Quadratwurzelfehler“ RMSE = $\sqrt{((ME)^2 + (ME)/N)}$.

Er ist immer positiv und der absolute Wert für den Gesamtfehler einer Transferfunktion. Die Tabelle 19 zeigt die Gütekriterien der im Rahmen der Validierung eingesetzten Transferfunktionen aus DVWK (1995), DIN (1998) sowie Lebert (2008).

Die RMSE liegen bis auf eine Ausnahme zwischen ca. 40 und 110 kPa. Die Fehler der Schätzung betragen somit i.d.R. 1 bis 2,75 Klassenbreiten, legt man eine Klassenbreite von 40 kPa gemäß Lebert & Schäfer (2005) zu Grunde. Bei den in DVWK (1995) bzw. DIN (1998) angeführten Klassenbreiten für die einzelnen Stufen der Vorbelastung von 30 bzw. 20 kPa ist die Abweichung allerdings noch gravierender.

Die Vorzeichen der ME sind allein ein Hinweis, dass die Schätzung der Vorbelastung je nach Pedotransferfunktion und Stratifizierung der Bodenarten zu einer Unter- oder auch Überschätzung der tatsächlichen Vorbelastung führen kann (s. a. Abbildung 5, 7 und 8).

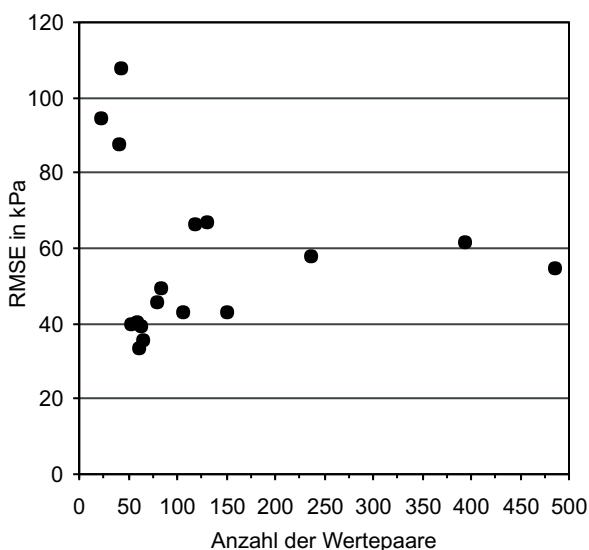


Abbildung 10:

Höhe des „Quadratwurzelfehlers“ (RMSE) in Abhängigkeit von der Anzahl der Wertepaare (geschätzt/gemessen)

Ein gewisser Einfluss auf die Höhe des RMSE durch die Anzahl der Wertepaare ist zu erkennen. So wird erst ab einer Anzahl von ca. 60 Wertepaaren ein RMSE mit einer Spanne von weniger als zwei Klassen erreicht (s. Abbildung 10).

Es ist sicherlich sinnvoll zu überprüfen, ob auf dem Niveau der Bodenartengruppen eine Anzahl von nur 60 Wertepaaren (gemessen/geschätzt) tatsächlich ausreicht, um einen RMSE von einer Klassenbreite (40 kPa) zu erreichen. Bei 11 Bodenartengruppen bedeutet dies dann aber 660 Wertepaare, und dies auch nur für einen Entnahmebereich wie z. B. 30 bis 60 cm Tiefe, also einen erheblichen Untersuchungsaufwand. Bei geringeren Klassenbreiten von 20 kPa wie sie DIN (1998) oder von 30 kPa wie sie DVWK (1995) für die Bewertung vorgeben, dürfte die Anzahl der benötigten Wertepaare durchaus höher liegen.

4. Fazit der Validierung

Die Studie des UBA (Lebert, 2008) beschreibt vor allem:

- den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und der Vorbelastung für die 5 Bodenartenhauptgruppen mit einem Bestimmtheitsmaß von 7 bis 54 %,
- die Ableitung von Schätzwerten der Vorbelastung mittels PTF gemäß DVWK (1995) und DIN (1998),
- den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung für die Bodenartenhauptgruppen mit einem Bestimmtheitsmaß von 27 bis 85 % bzw. den Zusammenhang zwischen effektiver Lagerungsdichte und den Schätzwerten der Vorbelastung von 23 bis 88 % für die 11 Bodenartengruppen,
- darauf aufbauend die Erstellung einer Matrix aus den fünf Klassen der Ld sowie der Vorbelastung, differenziert für die 11 Bodenartengruppen als Grundlage für eine Zuordnung von Klassenmittelwerten der Vorbelastung an die Legendeneinheiten der „BÜK 1000 N“ der BGR (Ad-hoc-AG Boden, 2005) als Grundlage für die entsprechende Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit“.

Die wichtigsten Ergebnisse der UBA-Studie wurden mittels gemessener Daten aus der Literatur der Jahre 1981 bis 2009 überprüft, vor allem im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der statistischen Zusammenhänge.

Betrachtet man die Ergebnisse, so zeigt sich dass:

- die Bestimmtheitsmaße für die Zusammenhänge von Trockenrohdichte bzw. effektiver Lagerungsdichte mit den Messwerten der Vorbelastung extrem gering sind,
- mit dem Datensatz die entsprechenden Ergebnisse der UBA-Studie nicht reproduziert werden konnten,

- die Schätzwerte nach DVWK (1995) und DIN (1998) mit tatsächlich gemessenen Werten nicht in Übereinstimmung zu bringen sind,
- die etwas besseren Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Vorbelastung_(geschätzt) zu einem sehr großen Teil sicherlich auf die hohe Sensitivität des Parameters Trockenrohdichte in den Schätzfunktionen nach DVWK und DIN beruhen dürften, was die Schlussfolgerung auf eine Autokorrelation des Parameters Trockenrohdichte nahe legt,
- die im Vergleich mit den gemessenen Daten besseren Bestimmtheitsmaße für die Schätzwerte nicht dazu führen dürfen, dass Transferfunktionen, die auf Schätzwerten basieren, Vorrang gegenüber den messwert basierten Funktionen gegeben wird,
- die Mittelwerte der Matrix „Klasse der effektiven Lagerungsdichte und Vorbelastung“ für die Bodenartengruppen durch eine große Streuung von häufig \pm einer Klassenbreite (40 kPa) gekennzeichnet sind,
- diese RMSE-Werte von 30 bis 60 kPa aufzeigen, dass eine Nutzung der Schätzwerte zu einer Fehlschätzung von ein bis zu fast drei Klassen führen kann,
- der jeweilige Trend der Modelle zu einer völligen Fehleinschätzung im Hinblick auf eine mögliche Zusatzbelastung bzw. hinsichtlich der tatsächlichen Belastbarkeit führen kann.

Im ersten Teil dieses Beitrages wird aufgezeigt, dass die methodischen Grundlagen der neuen Pedotransferfunktionen bzw. der darauf basierenden Matrix zur Schätzung der Vorbelastung nur schwer reproduzierbar sind, einer statistischen Absicherung nicht standhalten und eine Übereinstimmung zwischen Schätz- und Messwerten nicht nachweisbar ist. Dies wurde anhand der extrem geringen Bestimmtheitsmaßen für die Zusammenhänge zwischen der Rohdichte bzw. der effektiven Lagerungsdichte und der Vorbelastung herausgestellt und zwar sowohl für die geschätzten Werte als auch für die Messwerte der Vorbelastung. Der 1:1 Vergleich von Mess- und Schätzwerten ergab eine gravierende Unter- bzw. Überschätzung von einer bis zu drei Klassen, ohne dass aber Möglichkeiten für eine evtl. mathematische Korrektur dieser Abweichung zu erkennen sind. Eine Bewertung der Fehlermaße mittels RMSE belegt die Schwächen der mittels Transferfunktionen erzielten Ergebnisse.

Teil II dieser Arbeit diskutiert zunächst, ob die von Horn et al., 2009 publizierten Vorsorgewerte auf Basis der Vorbelastung für die gesetzlichen Aufgaben des Bodenschutzes geeignet sind. Weiterhin befasst er sich mit der Frage, ob die Schätzmethode zur Ableitung der Vorbelastung als Grundlage für die „Identifizierung sensibler Gebiete der Bodenverdichtung“ (risk areas) i. S. d. BSRL für die Bundesländer, insbesondere Hessen, einsetzbar ist.

Teil II: Bewertung eines Vorschages zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterböden)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen

Thomas Vorderbrügge* und Joachim Brunotte**

Part II: Appraisal of a proposal for deriving precautionary values for judging soil compaction according to the German federal soil protection act and of new pedotransfer function for identifying risk areas „compaction“ in Germany

Vorbemerkung:

Der folgende Text setzt die Nummerierung der Tabellen und Abbildungen aus Teil I fort, damit der direkte Bezug erhalten bleibt.

1 Einleitung

Ein großes Defizit der gesetzlichen Grundlagen des Bodenschutzes besteht in den immer noch fehlenden gesetzlichen Vorgaben zur Bewertung von Verdichtungen im Hinblick auf ihre Schadwirkung bzw. einer dadurch hervorgerufenen Beeinträchtigung der Bodenfunktionen (SRU, 2000; WBB, 2000).

Für die Einschätzung, ob eine Verdichtung als „schädlich“ im Sinne des §2 Abs. 3 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) (1998) einzustufen ist, benötigt der Bodenschutz eine Grundlage, die sowohl für die Fragen der §§6,7 und 17 des BBodSchG als auch des §12 der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999) bundesweit abgestimmt und einheitlich anzuwenden ist (Vorderbrügge, 2004).

Für die Beurteilung einer schädlichen (stofflichen) Bodenveränderung hat der Gesetzgeber bundeseinheitlich das Prinzip der „Bodenwerte“ [Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte] eingeführt. Ein erster prinzipieller Vorschlag für die Ableitung von „Bodenwerten“ zur Beurteilung einer Bodenschadverdichtung liegt vor (Vorderbrügge, 2004). Ein weiterer Vorschlag von bodenartspezifischen bodenphysikalischen Vorsorgewerten, u. a. für die Vorbelastung, wurde jüngst von Horn et al. (2009) publiziert. Mit der Einführung eines Vorsorgewertes der Vorbelastung werden

bisherige allgemeine Aussagen einer Klassifizierung wie „geringe“, „mittlere“ oder „hohe“ Vorbelastung in das Werte- und Normensystem der Gesetzgebung überführt. Bei einer Überschreitung des Vorsorgewertes ist „in der Regel davon auszugehen, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht“ (§8 Abs. 2 BBodSchG). Eine einheitliche Klassifizierung der Vorbelastung wäre aber auch eine wesentliche Grundlage bei der Ausweisung von Risikogebieten i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der EU. Im Folgenden werden deshalb zunächst die bisher publizierten Klassifikationen der Vorbelastung vorgestellt, sowie deren Grenzen in Beziehung zu den von Horn et al. (2009) vorgeschlagenen Vorsorgewerten gesetzt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der Nutzung der Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung für die Aufgaben des Vorsorgenden Bodenschutzes, insbesondere auch zu Möglichkeiten der Ausweisung von „risk areas“ auf Basis der BÜK 1000 N für das Bundesland Hessen.

2 Bewertung der Klassifizierungen der Vorbelastung sowie des Vorschages von „Vorsorgewerten“ der Vorbelastung nach Horn et al. (2009)

Die bisher bekannten Ansätze einer Klassifizierung der Vorbelastung zeigt die Tabelle 20. Die Klassifizierungen nach DVWK 234 (1995); DIN-V-19688 (1998) sowie Lebert & Schäfer (2005) unterscheiden sich deutlich in den jeweils zugrunde gelegten Klassenbreiten bzw. den Maximalwerten: letztere reichen von 130 bis über 200 kPa.

Der Literatur ist nicht zu entnehmen, nach welchen Kriterien die Festlegung bzw. die Änderung der Klassengrenzen im

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

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

Vergleich zu anderen Arbeiten begründet wird. Es ist nicht erkennbar, ob sie bodenfunktional bzw. ökologisch wie z. B. an Grenzwerten der Durchwurzelbarkeit begründet wurden oder ob es sich um eine rein statistische Herleitung, d. h. auf Basis einer angenommenen Normalverteilung sowie der ermittelten Extrema handelt. Den Einfluss unterschiedlicher PTF bzw. unterschiedlicher Klassengrenzen auf die Aussage einer Karte

zur „Verdichtungsempfindlichkeit der Unterböden“ ist aber gravierend. Dies zeigen Ergebnisse von Hennings & Düwel (2009), die fünf Varianten zur Berechnung der Vorbelastung bzw. der Klasseneinteilung für die BÜK 1000 N (Richter et al., 2007) verglichen. Je nach Verfahren und Klassengrenzen ergeben sich völlig unterschiedliche prozentuale Flächenanteile für die 5 bzw. 6 Klassen der Vorbelastung (s. Tabelle 21).

Tabelle 20:

Klassen der Vorbelastung (Pv) in kPa und ihre Bezeichnung in Publikationen aus dem Zeitraum 1989 bis 2009

Quelle	Vorbelastung (Pv) in kPa	Klasse	Klassenbezeichnung
Horn et al. (1989) zit. von Schamp & Martin (1991)	< 40 41 – 80 81 – 120 121 – 200 > 200	1 2 3 4 5	sehr hoch verdichtungsempfindlich hoch verdichtungsempfindlich mittel verdichtungsempfindlich gering verdichtungsempfindlich kaum verdichtungsempfindlich
DVWK 234 (1995)	<30 31 - 60 61 - 90 91 - 120 121 - 150 > 150	1 2 3 4 5 6	very low (sehr geringe) mech. Vorbelastung low (geringe) mean (mittlere) high (hohe) very high (sehr hohe) extremly high (extrem hohe)
Horn & Fleige (2001)			
Horn et al. (2005)			
Stahl et al. (2005)			
Ad-hoc-AG Boden (2000)			
DIN V Norm 19688 (1988)	< 70	1	sehr geringe mechanische Belastbarkeit
Ad-hoc-AG Boden (1999)	71 - 90	2	geringe
Lebert et al. (2004)	91 - 110	3	mittlere
Müller (2004b)	111 - 130	4	hohe
GD NRW (2006)	> 130	5	sehr hohe
Paul (2004)	< 90 91 - 110 111 - 130 131 - 150 > 150	1 2 3 4 5	sehr geringe Druckbelastbarkeit bei pF 2.5 !! geringe mittlere hohe sehr hohe
Lebert Schäfer (2005)	< 40	1	äußerst hohe Empfind. für zusätzliche Verdicht.
Lebert (2008)	41 – 80 81 – 120 121 – 160 161 - 200 > 200	2 3 4 5 6	sehr hoch hoch mittel gering sehr gering
van den Akker & Hoogland (2009)	< 80 81 - 150 151 - 200 > 200	k. A. k. A. k. A. k. A.	Compression Strength, based on precompression stresses
Strobel (1989)	k. A.	1	keine potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit
Müller (1997; 2004a)	k. A.	2	sehr geringe pot. Verdichtungsempfindlichkeit
Biakowski (2001)	k. A.	3	geringe pot. Verdichtungsempfindlichkeit
! Parameter ist die Setzungsempfindlichkeit (Sm) nach Horn (1981)!	k. A. k. A. k. A. k. A. k. A. k. A.	4 5 6 7	mittlere pot. Verdichtungsempfindlichkeit hohe potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit sehr hohe pot. Verdichtungsempfindlichkeit äußerst hohe pot. Verdichtungsempfindlichkeit

Tabelle 21:

Klassenanteile der Vorbelastung in Prozent für fünf Varianten der Transferfunktionen bzw. der Klasseneinteilung für die BÜK 1000 N (Richter et al., 2007) - aus Hennings & Düwel (2009).

Variante	Verdichtungsempfindlichkeit in Prozent der Flächen für die Klassen 1 - 6				
	1 sehr gering	2 gering	3 mittel	4 hoch	5 + 6 sehr hoch + äußerst hoch
A	12,5	22,1	20,0	7,5	38,0
B	7,8	7,8	24,6	51,8	8,0
C	32,8	29,3	26,5	7,3	4,1
D	-	5,8	46,8	43,2	4,2
E	-	17,8	29,2	46,9	6,1

Betrachtet man die Summen für die Klassen 4 bis 6 (hoch bis äußerst hoch) bekommt man, je nach Methode und Klasseneinteilung (A = 46 %, B = 60 %, C = 11 %, D = 47 % und E = 53 %), Flächenanteile zwischen 11 und 60 %. Für die Aufgaben des Bodenschutzes ist dies nicht akzeptabel. Hennings & Düwel (2009) schlagen deshalb vor: „Im Hinblick auf die Ausweisung verdichtungsgefährdeter Flächen („Risk Area Assessment“) nach EU-Bodenrahmenrichtlinie sollte detailliert erläutert werden, nach welchen Kriterien und für welchen Anwendungszweck die Skala möglicher Vorbelastungen neu interpretiert und in Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit eingeteilt wurde“.

Allein die Festlegung der Grenzen hat bereits großen Einfluss auf die Aussage der thematischen Karten. Dies verdeutlichen die Abbildung 12a bis 12c. Je nach gewählter Klassenbreite (Abb. 12a 20 kPa, Abb. 12b 30 kPa, Abb. 12c 40 kPa) ist der Anteil der Werte mit einer Abweichung zwischen „geschätzt“ und „gemessen“ von 1, 2 oder mehr „Klassenbreiten“ sehr unterschiedlich.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits die gewählte Klassenbreite die Aussagegenauigkeit der Ergebnisse bestimmt. Je größer die Klassenbreite desto geringer ist logischerweise auch der Anteil an Schätzwerten mit einer großen Abweichung (s. Tabelle 22). Alle drei Skalierungen werden in der Bundesrepublik angewendet. Für eine Vergleichbarkeit von Flächen bezogenen Aussagen muss die Herleitung der Klassengrenzen unbedingt erläutert werden, damit nicht der Eindruck einer gewissen Beliebigkeit entsteht, insbesondere dann, wenn man den Anspruch einer bundesweiten Gültigkeit der Methodik hat.

Den Arbeiten ist zudem nicht zu entnehmen, ob bzw. wie die Klassengrenzen gemäß den Vorgaben der Bodenschutzgesetzgebung abgeleitet wurden. Diese Frage gewinnt vor allem deshalb an Bedeutung, da in jüngeren Publikationen erstmals „test values“ (Horn & Fleige, 2009) bzw. „Vorsorgewerte“ (Horn et al., 2009) für die „Vorbe-

lastung“ vorgeschlagen wurden. Ob Horn & Fleige (2009) unter „test values“ Prüfwerte (eigentlich „trigger values“, BMU (1998)) oder tatsächlich Vorsorgewerte („precautionary values“) meinen, ist dieser Publikation allerdings nicht eindeutig zu entnehmen.

Tabelle 22:

Prozentuale Häufigkeit der Abweichung um Klassenbreiten zwischen Mess- und Schätzwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite

Klassenbreite in kPa	Abweichung um „n“- Klassen in Prozent		
	< 1 Klasse	1 – 2 Klassen	> 2 Klassen
20	31	29	40
30	47	29	24
40	60	25	15

Geht man von Vorsorgewerten aus, dann liegt nach Meinung der Autoren eine Überschreitung der Vorsorgewerte für Tone bei Werten von > 70 kPa, für Lehme bei Werten > 90 kPa und für Sande bei Werten > 130 kPa vor. Ein Wert für Schluffe wurde nicht vorgeschlagen. Diese Spezifizierung der Werte bzw. Klassengrenzen nach Bodenartenhauptgruppen (S, L, T) gibt es für die Klassifizierungen der Vorbelastung nach DVWK (1995) und DIN (1998) nicht.

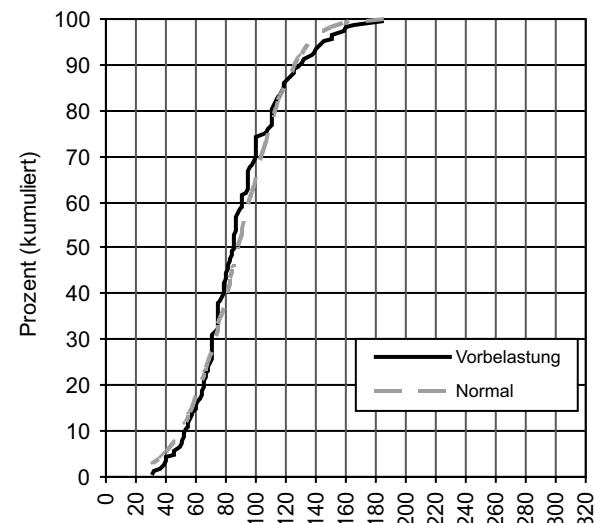


Abbildung 11:

Kumulative Verteilung der Messwerte der Vorbelastung (Linie durchgezogen) und die entsprechende kumulative Verteilung bei unterstellter „Normalverteilung“ der Messwerte (Linie gestrichelt) für die Bodenartenhauptgruppe Lehm

Im Folgenden wird zur richtigen Einordnung dieses Vorschlags am Beispiel der Messwerte aus der Literatur für die Bodenartenhauptgruppe Lehm aufgezeigt, wie viele der Werte den vorgeschlagenen Vorsorgewert überschreiten.

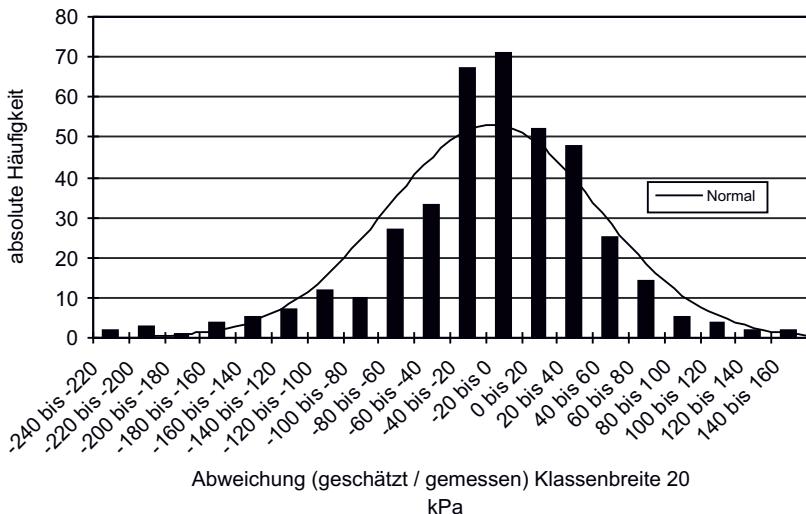


Abb. 12 a:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
20 kPa gemäß DIN-V-19688 (1998)

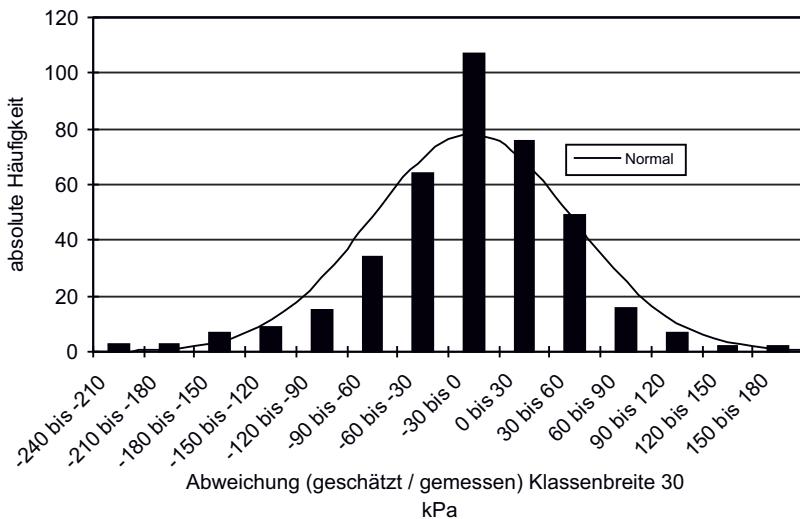


Abb. 12 b:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
30 kPa gemäß DVWK (1995)

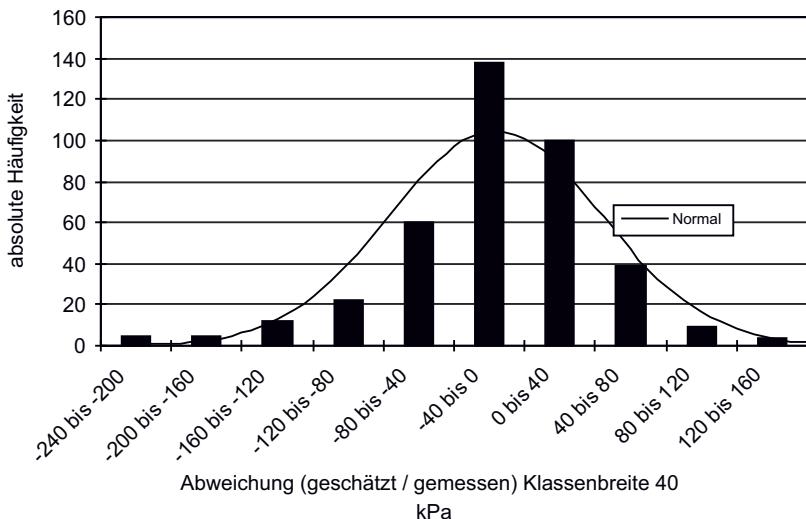


Abb. 12 c:
Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite.
40 kPa gemäß Lebert (2008)

Abbildung 12a bis 12c:

Häufigkeit der Abweichung der Schätzwerte von den Messwerten in Abhängigkeit von der Klassenbreite (20, 30, 40 kPa) der Methoden nach a: DIN-V-19688 (1998), b: DVWK (1995) und c: Lebert (2008)

Hierzu kann die kumulative Verteilung der Messwerte betrachtet werden (s. Abbildung 11). Gibt man fünf Klassen mit jeweils 20 % Anteil vor, dann liegen die Grenzen bei den Werten 65, 80, 90, 110 und 130 kPa. Die Werte der „Normalverteilung“ liegen in einer ähnlichen Größenordnung (s. Tabelle 23). Hinsichtlich des vorgeschlagenen Vorsorgewertes von 90 kPa hätte man also in nahezu 40 % der Fälle eine Überschreitung des Vorsorgewertes.

Tabelle 23:

Theoretische Ableitung von Klassengrenzen der Vorbelastung in kPa auf Basis der Daten aus der Literatur

Unterboden Lehm	Anteil der Mess- werte in % „durchgezogene“ Linie, Abb. 11)	Klassen- grenze in kPa	Anteil der Werte in % bei einer Nvtlg. „gestrichelte“ Linie, Abb. 11)	Klassen- grenze in kPa
Klasse 1	20	65	20	60
Klasse 2	40	80	40	80
Klasse 3	60	90	60	95
Klasse 4	80	110	80	110
Klasse 5a	90	130	90	125
Klasse 5b	100	> 130	100	> 125

Betrachtet man die Daten für die Bodenartenhauptgruppen Ton, Schluff und Sand nach dem in Abbildung 12 dargestellten Prinzip, dann bedeuten die von Horn & Fleige (2009) vorgeschlagenen Werte eine Überschreitung der Vorsorgewerte bei der Gruppe Ton für 80 % der Horizonte, bei Schluff (unterstellt man den Vorsorgewert für Lehm von 90 kPa) eine Überschreitung bei ca. 70 % und für Sand immerhin noch für 40 % der Horizonte (s. Tabelle 24).

Tabelle 24:

Theoretische Ableitung von Klassengrenzen der Vorbelastung in kPa auf Basis der Messdaten aus der Literatur, „fett und kursiv“ dargestellt die von Horn & Fleige (2009) vorgeschlagenen „Grenzwerte“

Bodenartenhauptgruppe nach KA5					
Anteil der Messwerte in %	Sand	Schluff	Lehm	Ton	
	kPa				
Klasse 1	20	60	70	65	70
Klasse 2	40	90	100	80	90
Klasse 3	60	(130)	120	90	120
Klasse 4	80	160	150	110	150
Klasse 5a	90	250	200	130	170
Klasse 5b	100	> 250	> 200	> 130	> 170

Diese Tabelle gibt zusätzlich einen deutlichen Hinweis darauf, dass eine einheitliche, die Bodenartenhauptgruppen nicht differenzierende Klasse der Vorbelastung in fünf

gleiche Klassen mit einer einheitlichen Klassenbreite von 40 kPa eigentlich nicht plausibel ist, liegen doch z. B. die Werte für Lehme in der Klasse 4 bis 6 deutlich unter den Werten für Sande, Schluffe oder Tone.

Inwieweit bei dem Vorschlag von Horn & Fleige (2009) die gesetzlich definierten Anforderungen zur Ableitung von Wertekollektiven für die Beurteilung einer schädlichen Bodenveränderung gemäß den Vorgaben des Bodenschutzes (Vorderbrügge, 2004) berücksichtigt wurden, ist im Vorschlag der Autoren nicht zu erkennen. Auch wurde nicht dargestellt, wie mit diesen Werten der erforderliche Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen den Werten und dem Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung zu erbringen ist (Vorderbrügge, 2004). Hier besteht durchaus noch großer Klärungsbedarf. Weiter lässt dieser Vorschlag die Einschränkung der Gültigkeit auf Unterböden von ackerbaulich genutzten Standorten offen. Dies würde bedeuten, dass für die forstliche Nutzung, für Vorsorgeaspekte beim Auf- und Eintrag von Böden (§6 BBodSchG), für Fragen einer ordnungsgemäßen Rekultivierung (§12 BBodSchV) jeweils neue Wertekollektive nach einem normierten Verfahren festgelegt werden müssten. Wenn das aufgrund der spezifischen Eigenschaften solcher Standorte seitens der Methodik erforderlich ist, dann müsste es selbstverständlich umgesetzt werden. Entscheidend ist, dies rechtzeitig zu benennen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Vorsorgewerte ausschließlich für eine Nutzung (Ackerbau) etabliert werden, für andere, aus Sicht des Bodenschutzes ebenso wichtige Fragestellungen aber nicht. Daraus würden sich für den Bodenschutz große Probleme ergeben.

3 Abschließende Betrachtung

Der von Lebert (2008) vorgeschlagene Ansatz ist die siebte „Generation“ von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Verdichtungsempfindlichkeit resp. der mechanischen Belastbarkeit seit der Arbeit von Horn aus dem Jahre 1981 (s. h. Tabelle 25). Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl von Modifikationen, insbesondere in der Gruppierung der Bodenartenuntergruppen durchgeführt. Für die Fälle, in denen die Grunddaten für eine Schätzung mittels einer PTF nicht vorhanden sind, stehen Schätztabellen in Form einer Matrix zur Verfügung. Sie ermöglichen eine nominalskalierte Schätzung der Vorbelastung allein auf Basis der klassifizierten Rohdichte bzw. effektiven Lagerungsdichte und der Bodenartenuntergruppen.

Im Prinzip gilt: Je höher die Vorbelastung eines Horizontes, desto geringer ist bei einer weiteren mechanischen Belastung, z. B. durch Befahrung mit großen Lasten, die Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen, vor allem aber bleibenden Verformung des Gefüges. Gemäß dieser Theorie führen im Umkehrschluss Belastungen unterhalb der

Vorbelastung nicht zu einer bleibenden (plastischen) Gefügeveränderung. Der Grad der Vorbelastung bewertet somit eigentlich den mechanischen „Ist-Zustand“ eines Horizontes und nicht dessen ökofunktionale Eigenschaften bzw. potenzielle Änderungen in der Funktionalität. Die Vorbelastung wird auch als eine Art Summenparameter angesehen, der die bisherige Belastungsgeschichte (etwa durch Befahrung, Austrocknung etc.) ebenso wie die Wirkung zurückliegender Strukturierungs- als auch Lockerungsprozesse widerspiegelt (Semmel, 1993). Die Komplexität der Größe lässt sich schon allein an der Vielzahl der sie beeinflussenden bodeneigenen Faktoren leicht erkennen.

In der folgenden Übersicht werden die bestimmenden Faktoren (bodeneigene sowie exogene) der Vorbelastung angeführt (Horn, 1981; 1988; 2004; Lebert, 1989; Horn et al., 1991a; 2001; 2002; Horn & Lebert, 1992; Semmel & Horn, 1993; Wiermann, 1998).

Übersicht 1:

Bodeneigene sowie exogene Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der Vorbelastung haben

<i>Bodeneigene Faktoren</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Korngrößenverteilung und -form, 2. Art (Typ) und Anteil der Tonminerale, 3. Art und Gehalt sorbierten Kationen, 4. Gehalt und Form organischer Substanz, 5. Gefügeform und Gefügestabilität (in Folge von Frost, Quellung und Schrumpfung), 6. biologische Aktivität, 7. Stabilisierung durch Wurzeln und organische Substanzen, 8. Stabilisierung durch anorganische Stoffe (z. B. Kalk, Fe-, Al-, Si-Oxide, Gips und Salze), 9. Aggregationsgrad, Anordnung der Aggregate im Gefügeverband, 10. Trockenrohdichte, Aggregatdichte, Porengrößenverteilung, Porenform, Porenkontinuität, 11. Wassergehalt, Wasserspannung, Porenwasserdruck und der 12. Wasserleitfähigkeit.
<i>Exogene Faktoren</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Intensität der Belastung, 2. Art der Belastung (dynamisch/statisch), Intensität des Schlupfes, 3. Häufigkeit der Belastung, Häufigkeit einer Befahrung, 4. Zeitdauer der Belastung, 5. technische Merkmale (Kontaktfläche und Kontaktflächendruck, Reifeninnendruck, Radlast, Stollendruck), 6. Bewirtschaftungsweise, 7. Reliefeinfluss (Hangneigung) und die 8. Zeit.

Die Pedotransferfunktionen berücksichtigen allerdings nur einen Bruchteil der in der Übersicht angeführten Größen und bilden die Komplexität der Größe Vorbelastung somit eigentlich nur mangelhaft ab.

Die Methode zur Bestimmung im Labor ist mehr oder weniger normiert und in der einschlägigen Literatur (Hartge & Horn, 2009; Horn & Baumgartl, 2002; HBU, 2008) bzw. in den o. a. Publikationen ausführlich beschrieben.

Die Ergebnisse unterschiedlicher Autoren müssten bei übereinstimmender technischer Versuchsanstellung eigentlich vergleichbar sein; Ergebnisse über Ringversuche (normierte Zylinder, gleiche Entnahmebedingungen, gleiches Mess- und Auswertungsverfahren) mit mehreren Laboratorien sind den Verfassern allerdings nicht bekannt.

Die Bedeutung einer solchen Normierung lässt sich beispielhaft an Daten aus einer Publikation von Zink et al. (2009) aufzeigen. In einem Überfahrungsversuch mit typischen landwirtschaftlichen Maschinen (Achslast bis zu 7,8 t) auf zwei Kalkmarschstandorten untersuchten sie den Einfluss der Befahrung auf die mechanische Stabilität. Beprobzt wurden drei Tiefen (25, 45 und 65 cm), die Vorbelastung wurde bestimmt nach Casagrande sowie mittels RETC. Erstaunlicherweise fanden sich am Standort 2 in allen 3 Tiefen nach der Befahrung niedrigere Werte der Vorbelastung als vor der Befahrung (s. Abbildung 13). Sowohl die Auswertung nach Casagrande als auch mittels RETC führten zum gleichen Sachverhalt.

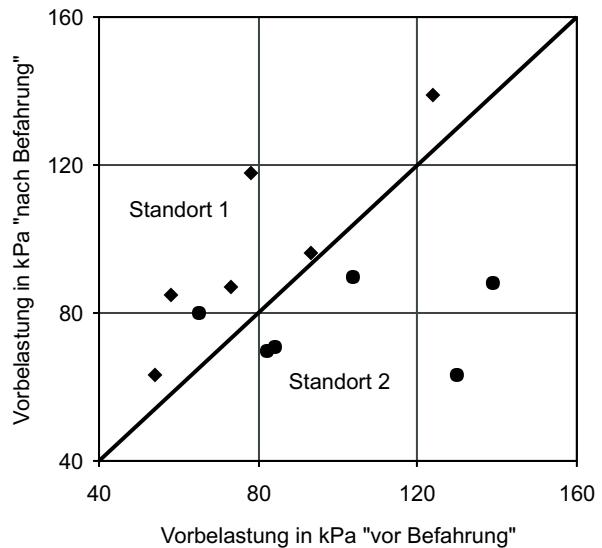


Abbildung 13:

Vergleich der Vorbelastungswerte für je drei Entnahmetiefen und zwei Bestimmungsmethoden aus einem Befahrungsversuch (zwei Standorte), ermittelt jeweils vor und nach einer Befahrung (eigene Darstellung mit Daten aus Zink et al., 2009)

Dieses unerwartete Ergebnis, bei dem eine Befahrung zu einer Wiederauflockerung des Unterbodens geführt

hätte, dürfte eher mit der Art der Beprobung oder Laboranalytik als mit den tatsächlichen Vorgängen im Unterboden erklärbar sein.

Einen nicht geringen Einfluss auf das Ergebnis hat wohl auch die Erfahrung der Versuchsansteller bei der endgültigen Bestimmung, d. h. bei der grafischen Auswertung der Messdaten der Vorbelastung nach Casagrande (Rücknagel et al., 2007; 2010). Hier kann es bei gleichen Labordatensätzen durchaus zu deutlichen Unterschieden kommen. So ergaben die Untersuchungen von Rücknagel et al. (2010) für 13 Standorte bei einer grafischen Auswertung durch fünf erfahrene Personen maximale Fehler von 1 bis 57 kPa. Die maximalen Fehler bei einer Auswertung mittels mathematischen Modellen reichten von 10 bis 77 kPa. Methodische Fehler von ein bis zwei Klassenbreiten (DVWK Klassenbreite 30 kPa) sind somit nicht ganz auszuschließen.

Neben der Erfahrung des Labors kann das Ergebnis auch durch die Wahl des Auswertungsverfahrens (grafisch; RETC) beeinflusst werden. Dies lässt sich ebenfalls an den bereits angeführten Versuchen von Zink et al. (2009) aufzeigen. Die Auswertung erfolgte sowohl nach dem grafischen Verfahren gemäß Casagrande als auch mittels des RETC-Verfahrens nach van Genuchten. Vergleicht man die mit den zwei Verfahren ermittelten Daten (s. Abbildung 14), so zeigen sich deutliche Abweichungen, vor allem im Bereich höherer Werte (> 80 kPa nach RETC). Es ist aber keine systematische Unter- oder Überschätzung zu erkennen, die Hinweise auf Möglichkeiten einer rechnerischen Korrektur ergeben könnten.

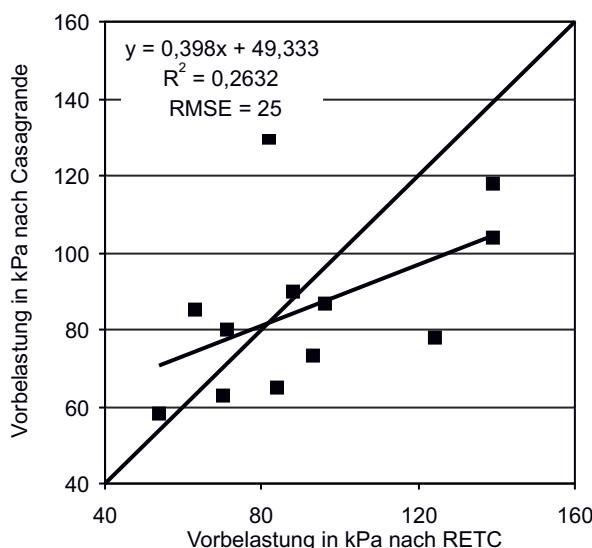


Abbildung 14:

Vergleich der Vorbelastungswerte von zwei Standorten mit je drei Entnahmetiefen für die zwei Bestimmungsmethoden Casagrande bzw. RETC (eigene Darstellung mit Daten aus Zink et al., 2009).

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen in ihren Untersuchungen auch Arvidsson & Keller (2004), Baumgartl & Köck (2004), Cavalieri et al. (2008), Clementino (2005), Keller et al. (2004) sowie Narra (2009). Es empfiehlt sich daher, die Verfahren der Auswertung zu harmonisieren und die Methoden der Bestimmung und Auswertung über Ringversuche, incl. einer Normierung durch und mit Messungen im Felde (Nolting et al., 2006), allgemeingültig zu beschreiben und zu vereinheitlichen. Zumindest die Fehlertoleranz der Methode wäre immer mit anzuführen, insbesondere dann, wenn belastbare Aussagen und der Einsatz der Methode für die Vorsorge im landwirtschaftlichen Bodenschutz (§17 BBodSchG) angestrebt werden.

Die Bestimmung der Vorbelastung im Labor für Flächen bezogene repräsentative Aussagen ist sehr aufwändig. Deshalb werden die Werte der Vorbelastung mittels Pedotransferfunktionen (PTF), d. h. mit Hilfe multipler Regressionsgleichungen, geschätzt. Die bis zum Jahr 2010 publizierten bzw. den Verfassern bekannten PTF sind in Tabelle 25 zusammengestellt.

Vom Prinzip her entsprechen sie alle dem von Horn (1981) gewählten Ansatz, sie unterscheiden sich nur in der Anzahl der zur Entwicklung der PTF genutzten Datensätze, der Anzahl der jeweils zu berücksichtigenden Parameter sowie der Art der Gruppierung der Eingangsdaten (bodenartbezogen oder tongehaltsbezogen). Eine substratbezogene Differenzierung gibt es bisher nicht.

Neben den Pedotransferfunktionen gibt es noch eine einfache Schätzung und zwar in Form einer Matrix mit Schätzwerten der Vorbelastung in Abhängigkeit von Bodenartengruppen und Klassen der Rohdichte (DIN, 1998; Hennings, 2001; Müller, 2004b) bzw. Klassen der effektiven Lagerungsdichte (Lebert, 2008).

Obwohl die ersten Transferfunktionen bereits vor 30 Jahren publiziert wurden, haben mit Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen bisher nur zwei Bundesländer dieses Thema systematisch aufgegriffen, die Methode in die Methodenbanken ihrer Bodeninformationssysteme aufgenommen und eine landesweite Auswertung vorgelegt (GD NRW, 2006; Biakowski, 2003; Müller, 1997; Müller, 2004a; 2004b; Lebert & Schäfer, 2005). Für Thüringen (Paul, 2004; Paul & Fettisov, 2007) gibt es eine landesweite Anwendung mit Aussagen zur Druckbelastbarkeit und zur Schadverdichtungsgefährdung (für ca. 42 % der Landesfläche bestehen demnach Schadverdichtungsrisiken) auf Basis einer leicht modifizierten Anwendung der Regressionen nach DVWK (1995). Die Ergebnisse einer „recht guten Übereinstimmung“ zwischen Schätzung und Messung sind für Thüringen für 6 Horizonte (0 bis 30 cm und 30 bis 40 cm) publiziert (Paul, 2004). Für Bayern gibt es eine Testanwendung für zwei Blätter (Schamp & Martin, 1996). Auch die Erstellung der DIN-V-19688 (1998) hat noch nicht dazu geführt, dass eines dieser Verfahren im Vorsorgenden Bo-

denschutz bundesweit anerkannt und weit verbreitet eingesetzt wird. Gründe hierfür finden sich in den Arbeiten von Schwertmann et al. (1990), Dürr et al. (1995), Frielinghaus et al. (1997), Sommer (1998), Van den Akker (1999), Nissen (1999), Quasem et al. (2000), Feldwisch (2000), Schäfer-Landefeld & Brandhuber (2001a, 2001b), Biakow-

ski (2001), Gysi (2001a, 2001b), Lebert et al. (2004), Keller et al. (2005), Cramer (2006), Cramer et al. (2006), Keller & Arvidsson (2006), Lebert (2008), Keller et al. (2009) und Schjønning et al. (2009). In vielen dieser Arbeiten wird u. a. auf die nicht zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der Daten bzw. ihre große Streuung hingewiesen.

Tabelle 25:

Pedotransferfunktionen zur Bestimmung der Vorbelastung in der Fachliteratur in der Reihenfolge ihrer Publikation

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedo-transferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigen Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmt-heitsmaße (r^2)
Horn (1981)	8 Berlin und Niedersachsen	10 PTF mit Fallunterscheidung nach Tongehaltsunterschieden	33 für 10 Bodenartenuntergruppen, mittels PTF abgeleitet wurde aber die Setzungsziffer (Sm)	PTF 1: 8; PTF 6: 6 PTF 2: 7; PTF 7: 6 PTF 3: 8; PTF 8: 5 PTF 4: 5; PTF 9: 4 PTF 5: 4; PTF 10: 4	4 Gruppen nach Tongehalt (< 10, 20, 45, > 45 %)	ebene Standorte	0,4900 bis 0,9801
Leber (1989), Horn et al. (1991a)	37 Bayern	11 PTF für pF 1,8 und 2,5, nochmals differenziert durch Berücksichtigung der Gefügeparameter: Winkel der inneren Reibung = ϕ und der Kohäsion = Koh.	118 für 17 Bodenartenuntergruppen nach KA3 bzw. 20 nach heute gültiger KA5	PTF 1: 7; PTF 2: 4; + ϕ und Koh. PTF 3: 3; - ϕ und Koh. PTF 4: 7; + ϕ und Koh. PTF 5: 5; - ϕ und Koh. PTF 6: 8; + ϕ und Koh. PTF 7: 6; - ϕ und Koh. PTF 8: 6; + ϕ und Koh. PTF 9: 4; - ϕ und Koh. PTF 10: 7; + ϕ und Koh. PTF 11: 5; - ϕ und Koh.	5 Gruppen: nach Bodenarten-hauptgruppe und Tongehalt; Sande, sandige Lehme dB > 1.10 g/cm³ und org. Subst. < 5 %; Schluffe sowie Tone und lehmige Tone mit < 35 % T bzw. > 35 % T	Sande dB > 1.3 g/cm³ und org. Subst. < 3 %; sandige Lehme dB > 1.10 g/cm³ und org. Subst. < 5 %; Schluffe dB > 1.2 g/cm³ und org. Subst. < 3 %; Tone und tL bei < 35 % T org. Subst. < 4.5 % falls dB < 1.35 g/cm³; Tone und tL > 35 % T falls org. Subst. > 10 % muss dB > 0,7 g/cm³ sein	0,3700 bis 0,8280
DVWK (1995)	k. A.	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.; zitiert wird Horn et al., 1991a; übernommen wurden die PTF Nr. 2, 4, 6, 8 und 10 aus Horn et al., 1991a	PTF 1: 4 PTF 2: 7 PTF 3: 8 PTF 4: 6 PTF 5: 7	5 Gruppen erweitert von 17 (Horn et al., 1991a) auf 23 Bodenartenuntergruppen: 1.) Ss, Su, Slu, Sl, St2, 2.) St3, Ls 3.) Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3 4.) Lu, Ut4, Lt2, Ts4, 5.) Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	Gehalt an organischer Substanz < 15 %; ebene Flächen d. h. < 2% Gefälle	k. A.
DVWK (1997)	30 aus 8 Bundesländern	7 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenhauptgruppen	k. A.; zitiert wird Nissen (1999); übernommen wurden die PTF Nr. 2 und 3 aus Nissen (1999)	PTF 1: 5; PTF 6: 4 PTF 2: 5; PTF 7: 5 PTF 3: 5; PTF 4: 4; PTF 5: 4;	7 Bodenartenhauptgruppen: Gesamt; Sande und Schluffe; Lehme und Tone: (L + T < bzw. > 35 % T)	k. A.	0,4330 bis 0,8890
Nissen (1999)	25 aus 8 Bundesländern	6 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenarten und Tongehalt	78 für 22 Bodenartenuntergruppen	PTF 1: 5; PTF 6: 4 PTF 2: 5; PTF 7: 5 PTF 3: 5; PTF 4: 4; PTF 5: 4;	Bodenartenhauptgruppen: Sande und Schluffe; Lehme und Tone; Sande und Schluffe; LT < 35 % T; LT > 35 % T	k. A.	0,4330 bis 0,8890

Fortsetzung Tabelle 25:

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedotransferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigen Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmtheitsmaße (r^2)
DIN-V-19688 (1998)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Ti, Tt	mäßig schwach geneigt (< 2 % Gefälle), bei mittlerer Hangneigung muss Neigung berücksichtigt werden; PTF1: dB > 1.30 g/cm³ Corg < 3 M.-%; PTF2: dB > 1.30 g/cm³ und Corg < 3 M.-%; PTF3: dB < 1.85 g/cm³ und Corg < 10 M.-%	k. A.
DIN-V-19688 (1998)	k. A.	Schätztafel in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohdichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	k. A.	3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Ad-hoc-AG Boden (1999)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenarten	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Ti, Tt	ebene Lage, bei geneigten Flächen (> 9 %) Berücksichtigung Hangneigungsfaktor; Projektkarten im Maßstab 1:5.000 bis 1:10.000	
Ad-hoc-AG Boden (1999)	k. A.	Schätztafel in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohdichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	k. A.	3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Ad-hoc-AG Boden (2000)	k. A.	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 4 PTF 2: 7 PTF 3: 8 PTF 4: 6 PTF 5: 7	5 Gruppen erweitert von 17 (Horn et al., 1991a) auf 31 Bodenartenuntergruppen: 1.) Ss, Su2-Su4, Slu, Sl2-Sl4, St2 2.) St3, Ls2-Ls4 3.) Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3 4.) Lu, Ut4, Tu4, Lt2, Ts4 5.) Lt3, Tu2-Tu3, Lts, Ts2, Ts3, Ti, Tt	k. A.	k. A.
Hennings (2001)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	154	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	Klassenbildung der mittels einer einheitlichen (aber nicht angeführten) PTF errechneten Vorbelastung	dB, Gehalt an organischer Substanz,	0,4900 0,5000 0,6100

Fortsetzung Tabelle 25:

Quelle	Anzahl der Profile und ihre Herkunft	Anzahl der Pedo-transferfunktionen (PTF) in der Publikation	Anzahl der Datensätze mit Angaben zu Vorbelastung bzw. Ermittlung der PTF	Anzahl der zu berücksichtigen Parameter bei den PTF 1 – n.	Grundlage der Gruppierung; Anzahl der Bodenarten; Grenze Tongehalt	Angaben zum Gültigkeitsbereich	Bestimmt-heitsmaße (r^2)
Hennings (2001)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	Trockenrohdichte (dB) - 3 Klassen und Bodenartenuntergruppen	Klassenbildung der mittels der drei PTF nach Hennings (2001) errechneten Vorbelastung (Pv)	Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
ATV-DVWK (2002)	k. A.	2 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenhauptgruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 5	2 Bodenartenhauptgruppen		k. A.
ATV-DVWK (2002)	k. A.	Empirische Schätztabelle für Werte der Vorbelastung (Unterboden)	k. A.	Sande und Schluffe 106 kPa als fixer Wert Lehme und Tone 76 kPa als fixer Wert	6 bzw. 7 Bodenartenuntergruppen in 2 fixen Gruppen Sande und Schluffe: Ss, Slu, SI3, Su3, Ut3, Ut4 Lehme und Tone: Ls3, Ls4, Lt2, Lt3, Tu3, Tu4, Ti		k. A.
Müller (2004b)	k. A.	3 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen	k. A.	PTF 1: 5 PTF 2: 4 PTF 3: 6	3 Bodenartenuntergruppen: 1.) Su2, Su3, Su4, Sl2, Sl3, Slu, Us, Uu, Uls, Ut2, Ut3 2.) Ss, St2, Sl4, Ls4, Ls3, Ls2, Lu, Ut4, Tu4 3.) St3, Ts4, Ts3, Ts2, Lts, Lt2, Lt3, Tu3, Tu2, Tl, Tt	ebene Lage, bei geneigten Flächen (> 9 %) Berücksichtigung Hangneigungsfaktor; Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:10.000 Neigungsstufe $\leq N2$	k. A.
Müller (2004b)	k. A.	Schätztabelle in Form einer Matrix	k. A.	dB (3 Klassen) und Bodenartenuntergruppen		3 Klassen der dB gemäß AG Boden (1994)	k. A.
Lebert (2008)	90 aus 12 Bundesländern	11 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartengruppen	180 für 27 Bodenartenuntergruppen	PTF 1- PTF 11 1 Parameter: effektive Lagerungsdichte (Ld)	11 Bodenartengruppen: 2 Gruppen \neq Def. KA5 durch andere Zuordnung des Sl3	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	0,232 bis 0,878
Lebert (2008)	90 aus 12 Bundesländern	5 PTF mit Fallunterscheidung nach Bodenartenuntergruppen bzw. -hauptgruppen	180 für 27 Bodenartenuntergruppen	PTF 1- PTF 5 1 Parameter: Trockenrohdichte	1.) Ss, St2, Sl2, Su2 2.) Sl3, Sl4, Su3, Su4, Slu, St3 3.) Schiffe, 4.) Lehme, 5.) Tone	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	0,273 bis 0,856
Lebert (2008)		Schätztabelle in Form einer Matrix als Regionalisierungsschlüssel		Effektive Lagerungsdichte (5 Klassen) und Bodenartengruppen keine PTF	11 Bodenartengruppen:	k. A. Projektkarten im Maßstab 1:5.000 - 1:1.000.000	k. A.

Mit dem aktuell vorgestellten Verfahren (Lebert, 2008) wird die Vorbelastung nur noch auf Basis eines einzigen Parameters, nämlich der Trockenrohdichte (dB) bzw. der effektiven Lagerungsdichte, regressionsanalytisch oder mittels einer Matrix abgeleitet. Diese Entwicklung steht im deutlichen Gegensatz zu aktuellen Aussagen in der Literatur, z. B. von Horn & Kutilek (2010): „...it should be obvious that the consideration of bulk density values and texture classes alone are insufficient to predict actual differences in site specific soil strength“.

Damit wird der Ansatz im Vergleich zu den multiplen Regressionen nach DVWK (1995), DIN-V-19688 (1998) oder ATV-DVWK (2002) mit bis zu acht zu berücksichtigenden Parametern (s. Tabelle 25) enorm vereinfacht. Es ist nicht auszuschließen, dass allein durch diese Vereinfachung die Methode eine breitere Anwendung als bisher erfahren wird. Dies ist umso kritischer zu betrachten, da doch schon die PTF nach DVWK (1995) und DIN (1998) nur einen geringen Teil der die Größe der Vorbelastung bestimmenden bodeneigenen Faktoren aufgenommen haben und selbst mit diesen PTF keine valide Schätzung erreicht wird. Eine kritische Überprüfung dieses neuen, aber auch der bisherigen Ansätze zur Schätzung der Vorbelastung bleibt im Hinblick auf Plausibilität und Validität der Aussagen vor einer Anwendung im Vorsorgenden Bodenschutz deshalb dringend geboten.

Das gilt vor allem aber auch dem Aspekt der Übertragbarkeit von Schätzwerten in die Fläche, d. h. insbesondere ihre Darstellung in Form von Karten zur „potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit“.

Zum einem stellt sich die Frage, ob das Verfahren wirklich für alle Bodenartenuntergruppen eingesetzt werden kann. Nimmt man z. B. die Definition der Vorbelastung der DIN-V-19688 (1998) wörtlich, lässt sich diese eigentlich nur für strukturierte Böden ableiten. Nach Kretschmer & Bohne (1993), Horn (1994, 2002) oder Horn & Baumgartl (2002) kann von einer nennenswerten Bindigkeit und Gefügeausbildung (Strukturierung) erst ausgegangen werden, wenn die Tongehalte oberhalb von 10 bis 15 % liegen. Bodenartenuntergruppen mit Tongehalten < 10 % werden seitens der Landtechnik (Sommer & Voßhenrich, 2002) aufgrund mangelnder Fähigkeit einer Gefügeausbildung für die konservierende Bodenbearbeitung ohne Lockerung als ungeeignet angesehen. Aufgrund dessen dürfte die Methode der Vorbelastung nach DIN-V-19688 für die beschriebenen Bodenartenuntergruppen eigentlich nicht verwendet werden. Bodenartenuntergruppen mit weniger als 8 % Ton sind Uu, Us, Su4, Su3, Su2, Sl2 und Ss, 8 bis 12 % haben der St2, Sl3, Ut2 und teilweise auch der Uls und Slu. Insgesamt wäre damit für 12 der 31 Bodenartenuntergruppen darzulegen, wie dieser Aspekt bei Fragen des Gültigkeitsbereichs der PTF gelöst wird.

Zum anderen gilt diese Frage auch für den Einfluss der Hangneigung auf die Vorbelastung. Sowohl nach DVWK (1995) als auch nach DIN-V-19688 (1998) gelten die Methoden nur für „ebene“ bzw. „mäßig schwach geneigte“ Standorte (< 2 % Gefälle). Nach Ad-hoc AG Boden (1999) wäre hingegen erst bei einer Hangneigung von > 9 % ein „Hangneigungsfaktor“ zu berücksichtigen, wie wird aber nicht erläutert. Auch wird nicht dargelegt, wieso diese Abweichung gegenüber der ursprünglichen Methodik zulässig ist. Eine aktuelle Reliefauswertung von erosionsgefährdeten Flächen für Hessen (Tetzlaff et al., 2009) ergibt folgendes Ergebnis: Hangneigung < 2 % ca. 25 % Flächenanteil und Hangneigung < 9 % ca. 85 % Flächenanteil. Gemäß Definition der ursprünglichen Methodik nach DVWK (1995) und DIN (1998) wären die im „Zweiten Bodenschutzbericht“ der Bundesregierung Flächen bezogenen Aussagen für Hessen somit nur für 25 % der Fläche gültig. Dabei wurde noch nicht einmal überprüft, ob nicht auch tonarme Bodenarten auf diesen Standorten vorzufinden sind. Auch dies ist ein Aspekt, der bei zukünftigen bundes- bzw. landesweiten Aussagen unbedingt zu berücksichtigen ist.

Gemäß der im „Zweiten Bodenschutzbericht“ der Bundesregierung veröffentlichten Karte der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete“ (Bt-Drs. 16/12658 2009), sind sowohl in Hessen als auch in Niedersachsen insbesondere die Regionen mit Böden aus Löss durch eine „hohe potentielle mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen“ ausgewiesen. Dabei handelt es sich vor allem um Regionen mit Böden der Legendeinheiten mit den Nummern 40 und 42 der BÜK 1000 N.

Bei der Einheit mit der Nummer 40 handelt es sich um „Tiefgründige, braune bis dunkelgraubraune, tiefhumose, lehmig-schluffige bis schluffige Böden mit z. T. schwarzgefärbtem, tonreicherem Unterboden aus Löss und z. T. umgelagertem Lösslehm (Tschnosem-Parabraunerde oder Parabraunerde-Tschnosem, z. T. als „Griserde“), örtlich kalkhaltig; auf Kuppen und an Hängen, z. B. in Erosionslagen, flachgründigere Böden aus unterschiedlichen Festgesteinen und deren Umlagerungsprodukten, (z. B. Pararendzina, Rendzina aus Kalkgesteinen, Regosol, Braunerde, Podsol aus Silikatgestein); an Unterhängen Kolluvisol; in Weinbaugebieten künstlich umgestaltete Böden (Rigosol); in Tälern Auenböden und Grundwasserböden (Gleye), selten Niedermoos“ (Adler 2008).

Bei der Einheit 42 handelt es sich um „Mittel- bis tiefgründige, braune Schluff-Böden mit tonreicherem Unterboden, aus Löss oder umgelagertem Lösslehm (Parabraunerde, in nordöstlichen Lössgebieten verbreitet Fahlerde) über verschiedenen Gesteinen; nicht selten mit Staunässeeinfluss (Pseudogley-Parabraunerde bzw. -Fahlerde, z. T. Pseudogley); örtlich Tschnosem-Parabraunerde bzw.

„Griserde“; in Nordwestdeutschland z. T. Brauner Plaggenesch; auf Kuppen und an steileren Hängen oft flachgründigere Böden (z. B. Regosol oder Pararendzina aus Löss, Ranker, Pelosol oder Braunerde aus Silikatgesteinen, Rendzina oder Braunerde-Terra fusca aus Kalkgesteinen); im bayerischen Tertiärhügelland häufig Braunerde aus Lösslehm über Tertiärsedimenten; in Tälern Kolluvisol, Auenböden und Gleye, selten Niedermoore“ (Adler, 2008).

Gemäß den repräsentativen tabellarischen Sachdaten bzw. bodenphysikalischen Kennwerten ist die Einheit 40 gekennzeichnet durch eine Trockenrohdichte der Klasse 3, eine Luftkapazität von 4 bis 7 Vol.-%, je nach Horizont und Tiefenlage, sowie die Bodenartenuntergruppen „Lu“ und „Tu3“ mit Polyeder- bzw. Subpolyedergefüge. Für die Einheit 42 wird eine Trockenrohdichte der Klasse 3 bis 4, eine Luftkapazität von 2 bis 4 Vol.-% sowie die Bodenartenuntergruppen „Ut3“, „Ut4“ und „Tu4“, ebenfalls mit Polyeder- bzw. Subpolyedergefüge angeführt (Adler, 2008).

Die Legendeneinheiten 40 und 42 der BÜK 1000 N sind gekennzeichnet durch eine weite Spanne der in diesen Einheiten jeweils zusammengefassten bodensystematischen Klassen. So finden sich in jeder Legendeneinheit bis zu neun dieser Klassen, und zwar Auenböden, Braunerden, Pelosole, Gleye, Lessivés (Parabraunerden), Ah/C-Böden (Pararendzinen, Rendzinen, Regosole), Stauwasserböden, Schwarzerden sowie terrestrische anthropogene Böden (Düwel et al., 2007a). Eine ebenso weite Spanne ergab die Auswertung der BGR (Düwel et al., 2007b), für die Bodenartenuntergruppen für die Oberböden der jeweiligen Legendeneinheiten. Sie ermittelten für die Einheit 42 mehr als 20 verschiedene Bodenartenuntergruppen für den Oberboden, kaum bzw. nicht vertreten waren nur die Bodenartenuntergruppen „Su4“, „St3“, „Ts2-Ts4“, „Tt“, „Tl“ und „Lts“, am häufigsten angetroffen wurde der „Ut4“. Die Percentilwerte P.5, P.50 und P.95 lagen für Sand bei 2,1, 12,1 und 63,1, für Schluff bei 26,9, 66,3 und 84,0 sowie für Ton bei 6,8, 17,9 und 34,0. Auch wenn es sich um eine Auswertung der Bodenartenuntergruppen der Oberböden handelt, kann man davon ausgehen, dass bei der weiten Spanne der in den Einheiten zusammengefassten Böden eine ähnliche Spanne an Bodenartenuntergruppen auch für die Unterböden vorzufinden sein wird.

Die Legendenbeschriebe sowie die Ergebnisse der Untersuchungen der BGR (Düwel et al., 2007 a, b) zeigen eindrucksvoll auf, welch eine Vielfalt an unterschiedlichsten Böden mit einer weiten Spanne der Körnung sowie der Eigenschaften in jeweils nur einer Einheit zusammengefasst wurden. Entsprechend muss man davon ausgehen, dass im Prinzip alle Klassen der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit für jede Legendeneinheit anzunehmen sein werden. Weder dem „Zweiten Bodenschutzbericht der Bundesregierung“ (Bt.-Drs. 16/12658 2009) noch den Ausführungen der UBA-Studie (Lebert, 2008) ist jedoch zu entnehmen, mit welcher

Flächen bezogenen Repräsentanz die Verdichtungsempfindlichkeit dargestellt wird und welche Spanne der Vorbelastung den Legendeneinheiten zugrunde liegen. Es ist durchaus vorstellbar, dass man für jede Legendeneinheit alle fünf Klassen der Vorbelastung resp. der Verdichtungsempfindlichkeit annehmen kann. Damit ist eine regionale bzw. Gebiets bezogene Differenzierung in Form einer Karte nicht zulässig. Wenn diese Art der Darstellung aber trotzdem gewählt wird sollte zumindest die Spanne der in den Legendeneinheiten abgebildeten Werte der Vorbelastung mit angeführt werden. Ohne diese Informationen sind belastbare Aussagen zur Repräsentativität der Werte nicht möglich.

In ihrem Vorschlag für eine Richtlinie zur „Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz“ (KOM (2006) 232 endgültig, 2006) hat die Kommission in Kapitel II (Abschnitt 1, Artikel 6.1) formuliert: „Binnen fünf Jahren [Datum der Umsetzung] bestimmen die Mitgliedsstaaten auf der geeigneten Ebene die nachstehend als „Risikogebiete“ bezeichneten Gebiete auf ihrem Hoheitsgebiet, bei denen stichhaltige Beweise vorliegen beziehungsweise der begründete Verdacht besteht, dass eine Verschlechterung der Bodenqualität durch eine oder mehrere Ursachen eingetreten ist beziehungsweise in naher Zukunft eintreten könnte:

- a. Erosion.....
- b. Verlust organischer Substanz.....
- c. Verdichtung durch erhöhte Bodendichte und verminderte Bodenporosität.
- d. Versalzung...
- e. Erdrutsche...

Zur Bestimmung der Gebiete werden durch die Kommission die mindestens zu berücksichtigenden Kriterien angeführt. Im Falle der Verdichtung handelt es sich um die folgenden Kriterien:

- a. Bodentypologische Einheit (Bodentyp),
- b. Oberboden- und Unterbodentextur (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- c. Oberboden- und Unterbodendichte (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- d. Organische Substanz im Boden (auf der Ebene der bodentypologischen Einheit),
- e. Klima,
- f. Bodenbedeckung,
- g. Bodennutzung (einschließlich Bodenbewirtschaftung, landwirtschaftliche Anbauformen und Forstwirtschaft),
- h. Topografie.

Eine anzuwendende Methode wird nicht angeführt. In Artikel 7 heißt es dazu: „Bei der Bestimmung von Risikogebieten können sich die Mitgliedstaaten auf empirische Daten oder Modelle stützen. Werden Modelle herangezogen, so sind sie zu validieren, indem die Ergebnisse mit empirischen Daten verglichen werden, die nicht für die Entwicklung des Modells selbst verwendet wurden“.

Eine erfolgreiche Validierung der Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Vorbelastung als Modell zur Ausweisung von „Risiko-Gebieten“ im Sinne der BSRL, hat sowohl für die Böden in Hessen als auch in Niedersachsen nach Meinung der Autoren bisher nicht stattgefunden. Die bisher publizierten Karten der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit“ durch das UBA bzw. die Bundesregierung erfüllen z. Zt. keinesfalls die methodischen Anforderungen des Entwurfs der BSRL.

Unabhängig von der Diskussion zur Ausweisung von „risk areas“ im Rahmen der BSRL könnten die Bundesländer bereits jetzt auf Grundlage des BBodSchG Gebiete bestimmen, in denen flächenhaft schädliche Bodenveränderungen auftreten oder zu erwarten sind. Diese Möglichkeit bietet ihnen §21, Abs. 3 BBodSchG - Landesrechtliche Regelungen. Nicht alle Länder haben allerdings von dieser Regelung bei der Formulierung ihrer Landesbodenschutzgesetze Gebrauch gemacht. Letztendlich bietet aber bereits das BBodSchG den Bundesländern die Möglichkeit mit eigenen oder bundesweit abgestimmten Methoden Gebiets bezogene Aussagen sowie Regelungen über Gebiets bezogene Maßnahmen zu treffen. Diese Möglichkeit und damit auch die Verantwortung bei der Methodik liegen bei den Ländern.

4 Zusammenfassung

Mit der Studie des UBA stehen nunmehr zwei weitere Gruppen von Pedotransferfunktionen bzw. eine weitere Matrix zur Schätzung der Vorbelastung zur Verfügung.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass es eine Vielzahl von kritischen Aspekten wie fehlende Reproduzierbarkeit, ungenügende Schärfe der statistischen Absicherung, keine Übereinstimmung zwischen Schätz- und Messwerten, nicht nachvollziehbare Klassifizierung der Werte etc. gibt. Bevor diese Methode als Grundlage zu einer bundesweiten „Identifizierung sensibler Gebiete (so genannter risk areas)“ empfohlen werden kann, sollten die aufgezeigten Probleme überzeugend gelöst werden. Vor allem aber müssen prognostizierte Werte und die dabei zu erwartenden schädlichen Wirkungen im Feld und nicht nur im Labor bestätigt werden (Lebert & Böken, 2004; Lebert et al., 2006). Ansonsten ist eine breite Zustimmung seitens der Beratung als Instrument der Vorsorge und des Vollzuges berechtigterweise nicht zu erwarten.

Die Ausführungen haben weiterhin gezeigt, dass die Schätzung der Vorbelastung mittels PTF für landesweite Aussagen keine belastbaren Ergebnisse bringt. Der Einsatz dieser Verfahren für eine landes- bzw. bundesweite Ausweisung von verdichtungsempfindlichen Böden könnte somit mangels einer fehlenden breiten Akzeptanz auf Seiten der Vorsorgepflichtigen die Ziele und Aufgaben des Vorsorgenden Bodenschutzes eher konterkarieren als unterstützen.

5 Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (1999) Ermittlung der Vorbelastung bei pF 1,8. Verknüpfungsregel 5.19: 1-7 [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/cln_092/nn_334064/DE/Themen/Boden/Zusammenarbeit/Adhocag/Downloads/Methode_1_4,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode_1_4.pdf> [zitiert 12.03.2009]
- Ad-hoc-AG Boden (2000) Verknüpfungsregel 5.2: Ermittlung der Vorbelastung bei pF 1,8. In: Methodendokumentation Bodenkunde : Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Stuttgart : Schweizerbart, pp 188-190
- Ad-hoc-AG Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Adler G (2008) schriftliche Mitteilung vom 08.09.2008
- Arvidsson J, Keller T (2004) Soil precompression stress : I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res* 74:85-95
- ATV-DVWK (2002) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Hennef, 27 p
- Baumgartl T, Köck B (2004) Modelling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci Soc Am J* 68:57-65
- BBodSchG - Bundes-Bodenschutzgesetz (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundesgesetzblatt : Teil 1 / Bundesminister der Justiz (16):502
- BBodSchV - Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999) Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bundesgesetzblatt : Teil 1 / Bundesminister der Justiz (36)1554
- BMU (1998) Federal Soil Protection Act of 17. March 1998 (Federal Law Gazette I p. 502). Translation, Bonn, 28.08.1998: 31 p
- Brandhuber R (2010) schriftliche Mitteilung vom 07.04.2010
- Brunotte J, Lorenz M, Sommer C, Harrach T, Schäfer W (2008) Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. *Ber. Landwirtsch* 86(2):262-284
- Cavaleri KMV, Arvidsson J, Silva AP da, Keller T (2008) Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res* 98:17-26
- Clementino V R (2005) Discussion of „An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays“. *Can Geotech J* 42:972-974
- Cornelius WB, Ronsyn J, van Meirvenne M, Hartmann R (2001) Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci Soc Am J* 65:638-649
- Cramer B (2006) Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und zur Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Bonn : Inst Bodenwiss, 235 p, Bonner Bodenkundl Abhandl 44
- Cramer B, Botschek J, Weyer T (2006) Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Bodenschutz* 3:64-71
- Deutscher Bundestag (2009) Unterrichtung durch die Bundesregierung : zweiter Bodenschutzbericht der Bundesregierung. Bonn, 77p, Drucksache / Deutscher Bundestag 16/12658
- DIN-V-19688 (1998) Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden : Vornorm DIN V 19688. Berlin : Beuth, 7 p
- Dürr HJ, Petelkau H, Sommer C (1995) Literaturstudie „Bodenverdichtung“. Berlin : Umweltbundesamt, 203 p, Texte / Umweltbundesamt 95/55, UBA-FB 95-036
- Düwel O, Siebner CS, Utermann J, Krone F (2007a) Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands : Bericht über länderübergreifende Punktinformationen im FISBo BGR [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Humusgehalte_Bericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Humusgehalte_Bericht.pdf> [zitiert am 28.11.2010]
- Düwel O, Siebner CS, Utermann J, Krone F (2007b) Bodenarten der Böden Deutschlands : Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR [online]. Zu finden in <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Bodenarten_Bericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Bodenarten_Bericht.pdf> [zitiert am 28.11.2010]

- DVWK (1995) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil I: Mechanische Belastbarkeit. Bonn : Wirtschafts- Verl -Ges Gas Wasser, 12 p, Merkbl Wasserwirtsch 234
- DVWK (1997) Bodenphysikalische Untersuchungen über Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen. Bonn : Wirtschafts- Verl -Ges Gas Wasser, DVWK-Materialien 1997/1
- Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibblewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Toth T, Varallyay G, Halla MY, Zupan M (2006) Common criteria for risk area identification according to soil threats. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, 94 p, European Soil Bureau Research Report 20
- Feldwisch N (2000) Untersuchungs- und Handlungskonzept für verdichtungsempfindliche Standorte in Sachsen : Studie erstellt im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 106 p, unveröffentlicht
- Fenner S (1997) Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Standort. *J Plant Nutr Soil Sci* 160(2):157-164
- Frielinghaus M, Müller L, Schrade A, Werner A, Bachinger J (1997) Maßstäbe bodenschonender landwirtschaftlicher Bodennutzung : Erarbeitung von Beurteilungskriterien und Meßparametern als Grundlagen für fachliche Regelungsansätze ; Bericht zum Teil 1 des Forschungsvorhabens Nr. 207 02 009 des Umweltbundesamtes Berlin. Müncheberg : ZALF, 154 p, UBA-FB 98-020
- GD-NRW (2003) Auskunftssystem Mechanische Belastbarkeit der Böden in NRW [online]. Zu finden in <<http://www.gd.nrw.de/cgi-bin/geoshop/toc705.pdf>> [zitiert am 11.11.2010]
- Glante F, Marahrens S, Mathews J, Hillges F (2009) Einsatz von Länderdaten für Bundesaufgaben : Vortrag Symposium „Bodenarten und ihre Nutzung“, Dresden, 02.09.2009 [online] Zu finden in <http://landwirtschaft.sachsen.de/umwelt/download/boden/Einsatz_von_Laenderdaten_fuer_Bundesaufgaben.pdf> [zitiert am 11.11.2010]
- Gysi M (2001a) Compaction of eutric cambisol und heavy wheel traffic in Switzerland : field data and a critical state soil mechanics model approach. *Soil Tillage Res* 61:133–142
- Gysi M (2001b) Bodenverdichtung : Vorbelastung als Stabilitätsmaß [online]. Zu finden in <<http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?lang=de&aid=18471&pid=20087>> [zitiert am 11.11.2010]
- Håkansson I, Voorhees WB, Elonen P, Raghavan GSV, Lowery B, van Wijk ALM, Rasmussen K, Riley H (1987) Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Res* 10:259–268
- Hartge KH, Horn R (2009) Die physikalische Untersuchung von Böden : Praxis, Messmethoden, Auswertung. Stuttgart : Schweizerbart, 178 p
- HBU – Handbuch der Bodenuntersuchung (2008) Bestimmung des Drucksetzungsverhaltens (Ödometerversuch) : Kapitel 5.1.10b, 30. Erg.-Lieferung/ Dezember 2008, 14 p
- Hennings V (2001) Vergleichende Bewertung bestehender Pedotransferfunktionen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. Arbeitshefte Boden 2001(3):5-22
- Hennings V, Düwel O (2009) Verdichtungsempfindlichkeit der ackerbaulich genutzten Böden in Deutschland : ein Vergleich nach verschiedenen Bewertungsansätzen. Postervortrag Jahrestagung der DBG 2009, Bonn, 11.09.2009
- Horn R (1981) Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Berlin : TU, 200 p, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung 10
- Horn R (1988) Compressibility of arable soils. In: Drescher J, Horn R, Bodt D (eds) Impact of water and external forces on soil structure : selected papers of the 1st Workshop on Soilphysics and Soilmechanics, Hannover 1986. Cremlingen-Destedt : Catena-Verl, pp 53-71
- Horn R (1994) Die Bodenstruktur : Regulator für Stofftransportprozesse in der Umweltforschung. In: Standortökologische Untersuchungen als Beitrag zu Landeskultur und Umweltschutz : wissenschaftliches Kolloquium zu Ehren von Prof. Dr. K. Bohne. Rostock : Univ, pp 21–28
- Horn R (2002) Soil mechanical properties and processes in structured unsaturated soils under various landuse and management systems. *Adv Geoecol* 35:305-318
- Horn R, Lebert M, Burger N (1989) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 6333-972-57238 gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 177 p
- Horn R, Lebert M, Burger N (1991a) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. München : Bayerisches Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen, Materialien / Baye-risches Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen 73
- Horn R, Baumgartl T, Kühner S, Lebert M, Kayser R (1991b) Zur Bedeutung des Aggregationsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. *Z Pflanzenernähr Bodenkd* 154:21-26
- Horn R, Lebert M (1992) Möglichkeiten und Grenzen der physikalischen Boden-rekultivierung in der Forstwirtschaft AFZ Wald 47(19):998–1004
- Horn R, Simonta C, Fleige H, Dexter A, Rajkaj K, De la Rosa D (2001) Möglicheit zur Prognose der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Wasser und Boden* 53(9):9-12
- Horn R, Fleige H (2001) Prediction of the mechanical strength and ecological properties of subsoils for a sustainable landuse. *Landnutzung Landentwickl* 42:23-30
- Horn R, Hartge KH (2001) Das Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. *Wasser und Boden* 53(9):13-19
- Horn R, Paul R, Simonta C, Fleige H (2002) Schutz vor mechanischer Belastung. In: Blume HP, Felix-Henningsen P, Fischer W, Frede HG, Horn R, Stahr K (eds) Handbuch der Bodenkunde. Weinheim : Wiley VCH, 14. Erg. Lfg 12/2002, Kapitel 7.4, 12 p
- Horn R, Fleige H, Prange N, Simota C, Dumitru E, Enache R, de la Rosa D, Morena J, Diaz-Pereira E, Mayol F, Dexter A, Czyz E, Rajkaj K (o.J.) SIDASS : a spatially distributed simulation model predicting the dynamics of agro-physical soil state within Eastern and Western European Countries for the selection of management practices to prevent soil erosion based on sustainable soil - water interaction; final report ; SIDASS-IC15-CT98-0106. Kiel : Univ, 27 p
- Horn R, Fleige H, Richter FH, Czyz EA, Dexter A, Diaz-Pereira E, Dumitru E, Enache R, Mayol F, Rajkaj K, Rosa de la D, Simota C (2005) SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Tillage Res* 82:47–56
- Horn R, Fleige H (2009) Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Tillage Res* 102(2):201–208
- Horn R, Fleige H, Peth S (2009) Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkun-de : Vorsorge- und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Böden in der Landwirtschaft. *Bodenschutz* 3:80–85
- Keller T, Arvidsson J, Dawidowski JB, Koolen AJ (2004) Soil precompression stress : II. A comparison of different compaction tests and stress-displace-ment behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res* 77:97–108
- Keller T, Weisskopf P, Arvidsson J (2005) Können Bodenverdichtungen durch das Beschränken der mechanischen Belastung auf Werte kleiner als die Vor-belastung vermieden werden? *Bulletin / Bodenkundl Ges Schweiz* 28:35–40
- Keller T, Arvidsson J (2006) Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden : experiences from wheeling experiments. *Arch Agron Soil Sci* 52(2):207-222
- Keller T, Arvidsson J, Rydberg T (2009) In situ stress-strain behaviour during wheeling experiments as compared to stress-strain behaviour measured in uniaxial compression tests in the laboratory ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-020 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Kuntze H (1986) Verdichtungen und Vernässungen des Bodens : Diagnose und Therapie. Wertermittlungsforum / Sachverständigen-Kuratorium Land-wirtsch, Forstwirtsch, Gartenbau, Landespfllege, Weinbau, Binnenfischerei 4(1986)3

- Kibblewhite MG, Jones RJA, Baritz R, Huber S, Arrouays D, Micheli E, Stephens M (2008) ENVASSO Final report : part I: scientific and technical activities ; contract 022713 [online]. Zu finden in <http://www.envasso.com/Publications/ENV_D11_FinalRep_prt2bk.pdf> [zitiert am 15.11.2010]
- KOM (2002) Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie : Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen. Luxemburg : Amt Amtl Veröff Europ Gemeinschaften, 41 p, Dokumente / Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2002/179
- KOM (2006) Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG (von der Kommission vorgelegt) [online]. Zu finden in <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kom_bodenschutz_vorschlag.pdf> [zitiert am 14.12.2010]
- Kretschmer H, Bohne K (1993) Beurteilung der Befahr- und Bearbeitbarkeit norddeutscher Moräneböden. Mitt Dt Bodenkdl Ges 71:65–68
- Le Bas C, Houskova B, Bialousz S, Bielek P (2008) Identifying risk or priority areas for soil degradation by compaction in Europe. FAGUS-Schriften 15:215–234
- Lebert M (1989) Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth : Univ, Bayreuther Bodenkundl Ber 12
- Lebert M (2008) Herleitung und Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik Deutschland : Zwischenergebnisse aus dem UBA-Vorhaben: „Entwicklung eines Prüfkonzepes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ FKZ 3707 71 202 – Entwurf [online]. Zu finden in <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/downloads/verdichtung_bericht.pdf> [zitiert am 16.01.2010]
- 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, 121 p, Texte / Umweltbundesamt 04/46
- Lebert M, Böken H (2004) Vermeidung von Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bodenschutz 2:36–43
- Lebert M, Schäfer W (2005) Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz 2:42–46
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C, Böken H (2006) Bodengefüge gegen Verdichtung schützen : Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden. J Plant Nutr Soil Sci 169(5):633–641
- Lebert M, Marahrens S (2009) Risk area identification according to soil compaction of agricultural soils in Germany : proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-013 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Marahrens S, Lebert M (2009) Auswertungskarten zur Verdichtungsgefährdung in der Bundesrepublik Deutschland auf der Basis der BÜK 1000. Postvortrag, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 5. bis 13. September 2009, Bonn
- Müller U (1999) Methodenbeschreibung sowie Verknüpfungsregel 7.6.5 - Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit „SM“. In: Müller U Auswertungsmethoden im Bodenschutz : Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Hannover : Nieders. Landesamt Bodenforsch., pp 34–35, pp 217–220
- Müller U (2004a) Methodenbeschreibung 5.7 sowie Verknüpfungsregel 6.6.5 – Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit „SM“. Arbeitshefte Boden 2004(2):30–31, 2004(2):242–245
- Müller U (2004b) Methodenbeschreibung 5.28 sowie Verknüpfungsregel 6.6.24 – Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (Vorbelastung nach DIN) aus der Vorbelastung bei pf 1,8. Arbeitshefte Boden 2004(2):72–73, 2004(2):271–275
- Narra S (2009) Influence of compaction curve modeling on void ratio and pre-consolidation stress. Int J Soil Sci 4(2):57–66
- Nissen B (1999) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland : bodenphysikalischer Ansatz. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkunde, Schriftenreihe / Inst Pflanzenern Bodenkunde 50
- 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 (2004) Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden [online]. Zu finden in <<http://www.ttl.de/ainfo/pdf/back1004.pdf>> [zitiert am 16.11.2010]
- Paul R, Fettsov A (2007) Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung [online]. Zu finden in <<http://www.ttl.de/ainfo/pdf/bods0207.pdf>> [zitiert am 16.11.2010]
- Quasem H, Attinger W, Berli M, Schulin R (2000) Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassen der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG3). Zürich : ETH, 41 p
- Richter A, Adler GH, Fahrak M, Eckelmann W, Siebner C, Baritz U, Behrens J, Hartwich R, Schmidt R, Stegger U, Utermann J, Wolff B (2007) Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1 000 000 : (BÜK 1000 N, Version 2.3). Hannover : BGR, 47 p
- Robinson TP, Metternicht G (2005) Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. Agric Syst 85:19–41
- Rücknagel J, Brandhuber R, Hofmann B, Lebert M, Marschall K, Paul R, Stock O, Christen O (2010) Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. Soil Tillage Res 106:165–170
- Schamp J, Martin W (1996) Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden. Mitt Dt Bodenkdl Ges 66(2):719–722
- Schäfer-Landefeld L, Brandhuber R (2001a) Die "mechanische Vorbelastung": eine geeignete Grundlage zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden? SchrifR Bayer Landesanst Bodenkultur Pflanzenbau 5(1):39–46
- Schäfer-Landefeld L, Brandhuber R (2001b) Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit von Böden : ein tragfähiges Konzept? Bodenschutz 2:48–52
- Schwertmann U, Schauder H, Beese F, Schmitt M, Matthies MU, Drescher-Kaden U (1990) Konzeptionelle Auswertung des FörderSchwerpunkts „Bodenbelastung und Wasserhaushalt im Bodenforschungsprogramm des BMFT“ : Band 1: Textband. Freising : Lehrstuhl Bodenkunde, TU München-Weihenstephan, 160 p, FKZ 03-39308-A
- Semmel H (1993) Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. 183 p, SchrifR Inst Pflanzenern Bodenkde 26
- Semmel H, Horn R (1995) Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. KTBL Schrift 362:61–92
- SoCo Project Team (2009) Addressing soil degradation in EU agriculture: relevant processes, practices and policies : report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)' [online]. Zu finden in <<http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/EUR-23767-web.pdf>> [zitiert am 26.11.2010]
- Sommer C, Stein Kampf H, Brunotte J (1998) Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz 3(1):12–16
- Sommer C, Voßhenrich H-H (2002) Bodenbearbeitung (TP 3-3) KTBL-Sonderveröffentlichung 038:237–249
- SRU – Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, (2000) Schritte ins nächste Jahrtausend : Umweltgutachten 2000 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Stuttgart : Metzler-Poeschel, 684 p
- Strobel P (1989) Untersuchungen zur Abschätzung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden unter Berücksichtigung der Auswertung von Bodenkarten. Hannover : Geograf Inst [Diplomarbeit]
- Tetzlaff B, Schreiner H, Vereeken H, Wendland F (2009) Modellgestützte Analyse signifikanter Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen [online]. Zu finden in <http://juvel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/3586/1/Energie%26Umwelt_29.pdf> [zitiert am 26.11.2010]

- Van den Akker JJJ (1999) Development, verification and use of subsoil compaction model SOCOMO. In: Van den Akker JJJ, Arvidsson J, Horn R (eds) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community : proceedings of the workshop of the Concerted Action "Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction", 28.-30 May 1998, Wageningen, The Netherlands. Wageningen : DLO-Staring Centre, pp 321-336
- Van den Akker JJJ, Simota C (2007) Risk assessment methods of compaction. RAMSOIL Project Report 2.3 Deliverable 2.3.2.5 [online]. Zu finden in <http://www.ramsoil.eu/NR/rdonlyres/9179FD01-072A-449C-8EE4-CE1D-C33DFF76/56724/PR23_compaction.pdf> [zitiert am 26.11.2010]
- Van den Akker JJJ, Hoogland T (2009) Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009 T4-031 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Vorderbrügge T (2004) Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bodenschutz 2:44–53
- WBB – Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz (2000) Wege zum vorsorgenden Bodenschutz : fachliche Grundlagen und konzeptionelle Schritte für eine erweiterte Boden-Vorsorge. Bonn, 105 p, Drucksache / Deutscher Bundestag 14/2834
- Wiermann C (1998) Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. 213 p, Schriftenreihe / Institut für Pflanzenernährung, Univ Kiel 45
- Willmott CJ (1982) Some comments on the evaluation of model performance. Bull Am Meteorol Soc 63(11):1309–1313
- Zink A, Fleige H, Horn R (2009) Zur mechanischen Stabilität von Kalkmarschen – Spannungsausbreitungs- und Bodenstabilitätsmessungen bei Überfahrungsversuchen (Kaiser-Wilhelm- und Kronprinzenkoog in Dithmarschen) [online]. Zu finden in <http://www.lbeg.de/extras/boden/downloads/boden_kueste/7_zink_stabilitaet_von_kalkmarschen.pdf> [zitiert am 28.11.2010]
- Literaturliste der Datenquellen (Tabelle 6)**
- Anken T (2003) Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswachung gepflügter und direktgesäter Parzellen [online]. Zu finden in <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:27275/eth-27275-02.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Anonymous (2003) Demonstrationsversuch auf der Dauerbeobachtungsparzelle „Oberacker“ [online]. Zu finden in <<http://www.pfluglos.de/media/documents/1242636549.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Arvidsson J (2001) Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters : I. Results from six long-term field experiments in southern Sweden. Report / Division of Soil Management, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences 100:66–78
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JJJ, Sjöberg E (2001a) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters : II. A model to avoid subsoil compaction. Report / Division of Soil Management, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences 100:99–107
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JJJ, Schjønning P (2001b) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden : II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. Soil Tillage Res 60:79–89
- Arvidsson J, Trautner A, Keller T (2002) Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. Adv Geocol 35:331–338
- Arvidsson J, Sjöberg E, van der Akker JJJ (2003) Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern sweden : III. Risk assessment using a soil water model. Soil Tillage Res 73:77–87
- Arvidsson J, Keller T (2004) Soil precompression stress : I. A survey of Swedish arable Soils. Soil Tillage Res 74:85–95
- Berli M (2001) Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery [online]. Zu finden in <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:24435/eth-24435-02.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Bonetti C, Rauber P, Sparachino A, Suter U (2004) Umgang mit ausgehobenem Boden auf Großbaustellen : bodenphysikalische und bodenbiologische Charakterisierung einer Rekultivierung mit unterschiedlich zwischengelagerten Böden. Zürich : ETH, Semesterarb Department D_BAUG, 52 p
- Cramer B (2006) Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und zur Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen [online]. Zu finden in <<http://hss.ulb.uni-bonn.de/2006/0782/0782.pdf>> [zitiert am 28.11.2010]
- Fazekas O (2005) Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat [online]. Zu finden in <http://eldiss.uni-kiel.de/macau/accept.htm?http://eldiss.uni-kiel.de/macau/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00001548/d1548.pdf;jsessionid=4E2404AA6114221983DF4BE7ED95ECE0?hosts=> [zitiert am 28.11.2010]
- Gysi M (2000) Soil compaction due to heavy agricultural wheel traffic. Zürich : ETH, 112 p
- Hammel K (1993) Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland. Hohenheim : Univ, 140 p, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 14
- Haubold-Rosar M (1996) Bodenphysikalische und -mechanische Eigenschaften landwirtschaftlich rekultivierter Böden aus Löß und Geschiebemergel/-lehm sowie Möglichkeiten ihrer Melioration. Aachen : Shaker, 185 p, Ber Geowiss
- Horn R (1981) Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngroßen. Berlin : TU, 200 p, Landschaftsentwickl Umweltforsch 10
- Horn R (1986a) Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. Z Pflanzenernähr Bodenkd 149:9–18
- Horn R (1986b) Ist die Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort anhand von Laborversuchen möglich? Z Vegetationstechnik 9:37–40
- Horn R (2004) Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. Soil Sci Soc Am J 68:1131–1137
- Horn R, Lebert M, Burger N (1991a) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben. München : Bayer Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen, 178 p, Materialien / Bayer Staatsminist Landesentwickl Umweltfragen 73
- Horn R, Baumgartl T, Kühner S, Lebert M, Kayser R (1991b) Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. Z Pflanzenernähr Bodenkd 154:21–26
- Horn R, Müller K, Meier D, Blume HP (1993a) Landschaften und Böden Norderdithmarschens. Mitt Dt Bodenkundl Ges 70:151–180
- Horn R, Baumgartl T, Roweck H, Köppermann C (1993b) Bodenentwicklung und ökologische Eigenschaften typischer Böden der Jungmoränenlandschaft : bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des SFB 192. Mittlg Dtsch Bodenkd Ges 70:275–286
- Horn R, Werner D, Baumgartl T, Winterot C (1994) Wirkungen technogener Druckbelastung auf die Spannungsverteilung und das Bodengefüge einer Schwarzerde aus Löß. Z Pflanzenernähr Bodenkd 157:433–440
- Horn R, Markgraf W, Baumgartl T, Bartsch W (2009) Wechselwirkung zwischen mechanischer Auflast und mikrobiologischer Aktivität in Böden. Bodenkultur 60:21–29
- Keller T, Arvidsson J (2004) Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction : effects of dual wheels, tandem axles and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. Soil Tillage Res 79(2):191–205
- 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

- Kühner S (1997) Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Kiel : Univ, 231 p, Schriftenreihe / Inst Pflanzenernähr Bodenkunde 39
- Lebert M (1989) Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth : Univ, 131 p, Bayreuther Bodenkundl Ber 12
- Lebert M, Springob G (1994a) Zur Rekultivierung von Lößböden : I. Wirkungen verschiedener Planierverfahren auf die Bodenstruktur. Z Kulturtech Landentwickl 35:112-121
- Lebert M, Springob G (1994b) Zur Rekultivierung von Lößböden : II. Wirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Unterbodenstruktur junger, planierter Flächen. Z Kulturtech Landentwickl 35:300-310
- Nissen B (1999) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland : bodenphysikalischer Ansatz. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 159 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkde 50
- Quasem H, Attinger W, Berli M, Schulin R (2000) Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassen der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG3). Zürich : ETH, 41 p
- Richter F-H (2005) Vergesellschaftung und Eigenschaften von Böden unterschiedlicher geomorphischer Einheiten einer Jungmoränenlandschaft des Ostholsteinischen Hügellandes. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 132 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkde 66
- Rücknagel J (2007a) Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Tönning : Der Andere Verl, 162 p, SchrR Pflanzenbauwiss Inst Agrar Ernährungswiss Univ Halle-Wittenberg 1
- Rücknagel J (2007b) Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden : Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007 [online]. Zu finden in <http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/Acker_und_Pflanzenbau/Fruchtfolge_und_Bodenkultur/Ackerbautagungen/abt07_ruecknagel.pdf> [zitiert am 30.11.2010]
- Rücknagel J, Harrach T, Dumbeck G, Gerschlauer F Christen O (2009) Morphological characterization of soil structure and the relation to precompression stress for recultivated loess soils ; proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-020 [online]. Zu finden in <http://worx5.webxtra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Schäffer B, Egenschwiler L, Suter B, Vogt L, Buchter B, Pfister H, Schulin R (2007a) Einfluss der Zwischenlagerung auf die anfängliche Entwicklung rekultivierter Oberböden. J Plant Nutr Soil Sci 170:669–681
- Schäffer B, Attinger W, Schulin R (2007b). Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery : soil physical and mechanical aspects. Soil Tillage Res 93:28–43
- Schwab P, Weisskopf P, Berli M, Rehbein K, Brunner H, Scheid S, Sommer M Ropka B (2006) Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften : Pilotprojekt LAZBO ; Teil 2: Bodenphysikalische Untersuchungen [online]. Zu finden in <http://www.bafu.admin.ch/boden-schutz/10161/10187/index.html?lang=fr_> [zitiert am 30.11.2010]
- Schneider R (1997) Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit und der bodenphysikalischen Standortbedingungen bei Neulandböden aus Löß. Z Kulturtech Landentwickl 38:27–31
- Semmel H (1993) Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Kiel : Inst Pflanzenernähr Bodenkde, 183 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkde 26
- Stahl H, Marschall K, Götz H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit : Abschlussbericht zum Projekt „Risikomanagement Bodengefüge“. Dresden : LfL, 132 p, SchrR Sächsischen Landesanst Landwirtsch 2005/15
- Stahl H, Marschall K, Freitag A, Götz H (2009) Bodendruck im Grünland : gute fachliche Praxis für Grünland: Bodengefüge und Narbenschutz [online]. Zu finden in <http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/jsp/inhalt.jsp?seite=detail&pub_id=3944> [zitiert am 30.11.2010]
- Stock O (2005) Untersuchungen zum Verfestigungsverhalten saalezeitlichen Geschiebemergels am Beispiel landwirtschaftlicher Rekultivierungsstandorte der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. Cottbus : Brandenburg TU, 126 p, Cottbuser Schr Bodenschutz Rekultivierung 30
- Tobias S (2005) Deriving threshold values for soil compaction from expert judgement [online]. Zu finden in <http://www.bodenkunde2.uni-freiburg.de/eurosoil/abstracts/id63_Tobias_full.pdf> [zitiert am 30.11.2010], ergänzt um bodenphysikalische Kennwerte per mail 2009
- Trautner A, Arvidsson J (2003) Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. Soil Tillage Res 73:107–188
- Voßbrink J (2005) Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren [online]. Zu finden in <http://eldiss.uni-kiel.de/macau/services/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00001434/d1434.pdf;jsessionid=B1ED2F107054563709CD6CA0B45CFBEA?hosts=> [zitiert am 30.11.2010]
- Weyers M (1994) Auswirkungen von Melioration und bodenschonender Bewirtschaftung auf Bodeneigenschaften und Wasserhaushalt rekultivierter Böden aus Löß im Rheinischen Braunkohlengebiet. Aachen : Shaker, 197 p
- Weyers M, Schröder D (1991) Bodeneigenschaften verschieden meliorierter Neulandböden aus Löß unter konventioneller und bodenschonender Bewirtschaftung. Mitt Dt Bodenkundl Ges 66(2):1039–1042
- Wiemann A, Warnecke S (2003) Auswertung und Interpretation der bodenmechanischen Versuche : Praktikumsbericht ; Modul 82 Großpraktikum Ökosystemanalyse und Landschaftsschutz III [online]. Zu finden in <<http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/praktikum/ss03/protokolle/Interpretation%20bodenmechanik.PDF>> [zitiert am 30.11.2010]
- Wiermann C (1998) Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstände. Kiel : Univ, 213 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkde 45
- Zink A (2009) Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. Kiel : Univ, 144 p, SchrR Inst Pflanzenernähr Bodenkde 84
- Zink A, Fleige H, Horn R (2008) Zur mechanischen Stabilität von Kalkmarschen : Spannungsausbreitungs- und Bodenstabilitätsmessungen bei Überfahrungsversuchen (Kaiser-Wilhelm- und Kronprinzenkoog in Dithmarschen) [online]. Zu finden in <http://www.lbeg.de/extras/boden/downloads/boeden_kueste/7_zink_stabilitaet_von_kalkmarschen.pdf> [zitiert am 30.11.2010]

Teil III: Ausweisung von „Risiko Gebieten“ auf Basis von Pedotransferfunktionen – die aktuelle Situation in Europa

Thomas Vorderbrügge* und Joachim Brunotte**

Part III: Risk area identification „soil compaction“ by making use of pedotransfer function – the current state in Europe

1 Einleitung

Für das Gebiet der Europäischen Union gibt es keine spezifischen Rechtsvorschriften zum Bodenschutz. Diese Lücke sollte die von der Europäischen Kommission im Jahr 2006 vorgelegte „Thematische Strategie für den Bodenschutz“ (COM, 2006a) sowie der im gleichen Jahr vorgelegte Vorschlag einer „Rahmenrichtlinie für den Bodenschutz (BSRRL)“ (COM, 2006b) schließen. Die parlamentarische Umsetzung der Rahmenrichtlinie hat bisher allerdings noch nicht die erforderliche politische Zustimmung gefunden. Strategie und Rahmenrichtlinie sollen der Umsetzung des Nachhaltigkeitsgebots sowie der Erfüllung der Vorsorgepflichten in Bezug auf die Böden in Europa dienen. Eine ausführliche Darstellung der Aspekte des Bodenschutzes in Europa, insbesondere der umfangreichen fachlichen und politischen Vorarbeiten seit der Verabschiebung der Europäischen Boden Charta 1972 sowie der Gründung des europäischen Bodenforums 1998 in Bonn, findet sich bei WBGU (1993, 1994), Vorderbrügge (1999) sowie Lee (2006).

Zentraler Bestandteil des Entwurfs der Rahmenrichtlinie ist aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes das Kapitel II „Risikovermeidung und -minderung, Wiederherstellung“. Dieses Kapitel beinhaltet u. a. eine „grobe“ Festlegung von Leitlinien für die Bestimmung und Ausweisung der so genannten „Risikogebiete“. Diese bezeichnen Gebiete, bei denen „stichhaltige Beweise vorliegen beziehungsweise der begründete Verdacht besteht, dass eine Verschlechterung der Bodenqualität durch Erosion und/oder Verlust an organischer Substanz, Verdichtung, Versalzung sowie Erdrutsche eingetreten ist beziehungsweise in naher Zukunft eintreten könnte“ (COM, 2006b). Seitens der Rahmenrichtlinie werden für die Art der Festlegung von Risikogebieten nur zwei Vorgaben formuliert. Zum ei-

nen haben die Mitgliedstaaten zumindest die im Anhang I der Richtlinie angeführten Kriterien zu berücksichtigen. Zum anderen können sie sich bei der Festlegung auf empirische Daten oder auf Modelle stützen. Werden Modelle herangezogen, so sind sie zu validieren, indem die Ergebnisse mit empirischen Daten verglichen werden, die nicht für die Entwicklung des Modells selbst verwendet wurden. Insbesondere dieser Aspekt stellt eine sehr hohe Anforderung an den Einsatz von Modellen zur Ausweisung der Risikogebiete.

Im Rahmen der umfangreichen fachlichen Vorarbeiten zur BSRRL, vor allem zur Harmonisierung der europaweiten Grundlagen, wurden durch die so genannten „Soil Information Working Groups (SIWG)“ im Auftrag der „Direktion Umwelt der Kommission“ die methodischen Vorgaben der BSRRL, insbesondere zur Ausweisung der „Risikogebiete“ entwickelt (Eckelmann et al., 2006).

Danach stehen drei Ansätze zur Ausweisung der Risikogebiete zur Verfügung:

- Qualitativ – d. h. eine ungefähre Abschätzung, vornehmlich expertengestützt, auch unter Berücksichtigung der in der BSRRL angeführten Kriterien,
- Quantitativ – flächenhafte Ausprägung der Beeinträchtigung (Status), basierend auf Messdaten aus Erhebungs- und Monitoringprogrammen und unter Berücksichtigung von Grenzwerten,
- Modellhaft – d. h. Einsatz von Modellen zur Ableitung des aktuellen Status der Bodenqualität (Verdichtung), für Trendaussagen sowie zum Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungssysteme auf die Bodenqualität (Verdichtung).

Im Folgenden wird zunächst der uns bekannte Sachstand zum Status der Bodenverdichtung in Europa dargestellt. Anschließend werden die z. Zt. in der Fachliteratur diskutierten Ansätze zur Darstellung von „Risikogebieten Bodenverdichtung“ erörtert.

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

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

2 Status der Bodenverdichtung – insbesondere des Unterbodens – in Deutschland und Europa

Eine repräsentative, bundesweite Untersuchung über den Gefügezustand der Unterböden in Deutschland ist uns nicht bekannt. So zeigt z. B. die Auswertung von Lorenz (2008), dass es im Prinzip keine belastbaren Grundlagen für einen bundesweiten Statusbericht gibt und generelle und allgemeingültige bundesweite Aussagen zum Gefügezustand der Unterböden schwierig sind. Die Literaturauswertung von Lorenz (2008) ergab nur für einzelne Bundesländer und dies auch wiederum nur für einige Landschaften bzw. Substrate der Bodenbildung (i. d. R. Löss bzw. Lösslehm) Aussagen zum Status der Bodenverdichtung. Eine flächendifferenzierende, quantitative Ausweitung bzw. Abgrenzung von Risikogebieten auf der Basis von Monitoringdaten bzw. von Erhebungsuntersuchungen dürfte im Moment für Unterböden in Deutschland deshalb schwierig sein. Auch die aktuelle Untersuchung von Lebert (2010), in der Daten aus Monitoringprogrammen der Bundesländer ausgewertet wurden, gibt nur eine erste grobe Einschätzung über den bundesweiten „Status“. Nach dieser Auswertung wären die Unterböden landwirtschaftlich genutzter Flächen in großen Regionen im Westen von Schleswig-Holstein, im Süden Niedersachsens, im Osten Sachsen, großen Teilen von Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern gekennzeichnet durch „ungünstigen¹“ bzw. „sehr ungünstigen“ Gefügezustand, bundesweit würde dies für 46 % der Ackerflächen gelten. Für einzelne Bundesländer (Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz) ergab die Auswertung fast flächendeckend einen „ungünstigen“ bzw. „sehr ungünstigen“ Gefügezustand. Dies ist eine Größenordnung, die zumindest für Hessen, z. B. durch die Ergebnisse von Profilaufnahmen auf Acker- und Grünlandstandorten [ca. 1000 für den Zeitraum 2000 bis 2010] nicht belegt werden kann. Auch hätte solch ein weit verbreiteter ungünstiger Gefügezustand in den angeführten Bundesländern sich deutlich auf die Ertragsbildung der landwirtschaftlichen Kulturen auswirken müssen. Hierzu liegen den Autoren aber keine Erkenntnisse vor.

Im Hinblick auf Europa ist die Situation ähnlich. Umfangreiche repräsentative Messungen zum Zustand des Unterbodenengefüges für einzelne Mitgliedsstaaten der Europäischen Union liegen, soweit uns bekannt, ebenfalls nicht vor. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen WBGU (2009) sowie Kuhlman et al. (2010). Es finden sich im Prinzip nur Aussagen mit flächenbezogenen Schätzungen und

diese stammen aus der Publikation von Oldemann et al. (1991). Die beiden ebenfalls häufig zitierten Arbeiten von van Lynden (1993) und von Fraters (1996) zitieren wiederum selbst die Ergebnisse von Oldemann et al. (1991) oder aber beschreiben die Verdichtungsgefährdung der Unterböden aber nicht den Status. Der Kenntnisstand über den Gefügezustand der Unterböden in Europa ist für quantitative flächenrepräsentative Aussagen extrem gering. Eine Auswertung der in Übersicht 1 angeführten Literatur er gab, dass im Grunde für kein Land der Europäischen Union flächendeckende, regional differenzierende Aussagen zum Zustand des Unterbodenengefüges möglich sind. Der quantitative Ansatz zur Ausweisung von Risikogebieten (Eckelmann et al., 2006) dürfte deshalb zurzeit nur bedingt möglich sein.

Jüngere Publikationen der letzten Jahre zitieren i. d. R. die älteren Angaben aus der Fachliteratur und liefern keine neuen Ergebnisse auf Basis von Messungen. Auch in den aktuellen Publikationen für einzelne Mitgliedstaaten (England, Dänemark, Österreich, Niederlande), die sich gezielt mit der Thematik „Ausweisung von Risikogebieten“ (risk areas) auseinandersetzen, finden sich keine Flächen deckenden Aussagen zum tatsächlichen Status der Bodenverdichtung, insbesondere des Unterbodens (s. Übersicht 1).

In der internationalen Fachliteratur ist es allerdings unbestritten Konsens, dass Bodenverdichtungen, vor allem des Unterbodens, die Bodenfunktionen nachhaltig beeinträchtigen und im Sinne der Vorsorge unbedingt zu vermeiden sind, zumal sie nicht bzw. nur mit immensem Aufwand regenerierbar sind. Ein gravierendes Problem sei zudem der Mangel an Daten zur Ausprägung und Verbreitung der Unterbodenverdichtung in Europa.

¹ „sehr ungünstig“: effektive Lagerungsdichte $\geq 1,8$; LK ($> 50 \mu\text{m}$) $< 5 \text{ Vol.-\%}$; kf $< 10 \text{ cm/d}$; „ungünstig“: effektive Lagerungsdichte 1,7 - $< 1,8$; LK ($> 50 \mu\text{m}$) 5 - $< 7 \text{ Vol.-\%}$; kf 10 - $< 40 \text{ cm/d}$

Übersicht 1:

Angaben zum Status der Unterbodenverdichtung der Böden in Europa

Autor	Jahr	Region	Methode / Projekt	Klassen	Angaben der degradierten Fläche in % oder ha bzw. die in der Publikation angeführte Literatur
Oldemann et al.	1991	weltweit	expertengestützt GLASOD	4	<p>Klassifizierung: insgesamt 33 Mill. ha</p> <p>1. light: The terrain has somewhat reduced agricultural suitability, but is suitable for use in local farming systems. Restoration to full productivity is possible by modifications of the management system. Original biotic functions are still largely intact. (24.8 Mill ha)</p> <p>2. moderate: The terrain has greatly reduced agricultural productivity but is still suitable for use in local farming systems. Major improvements are required to restore productivity. Original biotic functions are partially destroyed. (7,8 Mill. ha)</p> <p>3. strong: The terrain is non reclaimable at farm level. Major engineering works are required for terrain restoration. Original biotic functions are largely destroyed. (0,4 Mill. ha)</p> <p>4. extreme: The terrain is irreclaimable and beyond restoration. Original biotic functions are fully destroyed.</p>
van Lynden	1993				<p>Oldemann et al. (1991)</p> <p>Zitat: „Physical deterioration is significant, in particular compaction (90 % of all physical deterioration) poses problems in at least 15 % of all degraded soils in Europe“.</p>
Soane & van Ouwerkerk	1995	Europa und Afrika			Oldemann et al. (1991) sowie van Lynden (1993)
EEA	1995				Oldemann et al. (1991) sowie van Lynden (1993)
Fraters	1996	Europa	expertengestützt vulnerability	3	generalisierte Bodenkarte von Europa (!) mit 11 Einheiten Vulnerability: 18 % der Fläche moderate; 32 % der Fläche high
Werner et al.	1997	Deutschland	expertengestützt		<p>Zitat: „Verbreitung von Schadverdichtungen in Deutschland: auf den besonders verdichtungsempfindlichen mischkörnigen humusarmen Sandböden reichen die Schadverdichtungen auf 50 bis 70 % der Ackerfläche bis in ca. 60 cm Bodentiefe. Auf Löß- und Verwitterungsstandorten mit Böden höherer Gefügestabilität liegt die mittlere Verformungstiefe bei ca. 40 cm. Die betroffene Fläche beträgt etwa 10 bis 20 % bei ausgeprägter Konzentration auf die Feldrandbereiche (Wendezonen, Abfahrrassen)“.</p>
EUA	1998				<p>van Lynden (1993)</p> <p>Zitat EUA: „Der Verlust an organischer Substanz und die damit einhergehende Degradation der Bodenstruktur begünstigen in starkem Maße die Bodenverdichtung. Dies ist die in Europa am weitesten verbreitete Form der physikalischen Degradierung von der etwa 90 % der Gesamtfläche betroffen sind“.</p>
Soane & van Ouwerkerk	1998	Europa			Ursachen der Verdichtung; keine Angaben zu Status
Lawrence	1999	Europa		k. A.	EEA (1995)
Berlie et al.	1999	Schweiz			<p>Literaturauswertung</p> <p>Zitat: „10 bis 15 % of agricultural soils were overcompacted“.</p>
Chamen & Spoor	1999	England and Wales			<p>Literaturauswertung</p> <p>Zitat: „eine flächendeckende Aussage sei nicht möglich“.</p>
Horn & Wiermann	1999	weltweit			<p>Oldemann (1991), Soane & van Ouwerkerk (1994)</p> <p>Zitat: „Oldemann 1991 and Soane & van Ouwerkerk 1994 have intensely pointed out that about 20 % of total soil degradation in the world can be defined as induced by soil compaction, while even only in Europe about 33 Mha of arable land are already completely devasted by non-site-specific wheeling and tillage processes“.</p>

Fortsetzung Übersicht 1

Autor	Jahr	Region	Methode / Projekt	Klassen	Angaben der degradierten Fläche in % oder ha bzw. die in der Publikation angeführte Literatur
van Lynden	2000	Central and Eastern Europe (!)	expertengestützt	5	62 Mill. ha bzw. 11 % der Gesamtfläche
van den Akker & Canarache	2001	Europa			van Lynden (1993), Soane & van Ouwerkerk (1995), Fraters (1996)
EUA COM (2002)179 Final	2002	Europa	nicht thematisiert		Bodenverdichtung nicht thematisiert
	2002	Europa	expertengestützt		zitiert Daten aus „United Nations Environment Programme and International Soil Reference and Information Centre 1992 GLASOD-Projekt“ Europaweit fast 4 % der Böden durch Verdichtung geschädigt; genaue Angaben seien jedoch nicht verfügbar
EEA	2003	Europa	Karte der physikalischen Boden-degradation in Europa von 1993 Quelle: ISRIC		Karte; Quelle van Lynden (1993)
Imeson et al.	2004	Europa			Oldemann (1991)
Crescimanno et al.	2004	Europa			Fraters (1996) Zitat: „no precise data are available“.
Görlach et al.	2004	Europa			Oldemann et al. (1991), van Lynden (1993), EEA (1995), EUA (1998) Zwischenberichte des ENVASSO-Projektes
Roemkens & Oenema	2004	Niederlande			Zitat abstract: „There is some evidence that soil compaction and especially subsoil compaction is increasing in scale and extent, but there is as yet little quantitative information“.
van den Akker	2004	Niederlande			Zitat abstract: „... is no empirical information about the scale, extent and seriousness of soil compaction in practice“.
defra	2004	England			keine flächenbezogenen Angaben zum Status
European Commission	2005	Europa		k. A.	25 Mill. ha deemed to be lightly compacted, 36 Mill. ha were more severely affected
Lebert & Schäfer	2005	Niedersachsen	Vorbelastung Gefügeuntersuchung	k. A.	keine flächenbezogenen Angaben zum Status
le Bas et al.	2006	Europa		k. A.	keine flächenbezogenen Angaben zum Status
EC – European Commission (231)	2006	Europa			van Camp (2004), Crescimanno (2004), van Ouwerkerk & Soane (1995) <ul style="list-style-type: none"> • 4 % der Fläche der EU – 33 Mill. ha; • 36 % der Unterböden: „high oder very high susceptibility“ • 32 % der Böden „being highly vulnerable“ and „18 % moderately affected“
Lebert & Schäfer	2007	Niedersachsen	Vorbelastung Gefügeuntersuchung	k. A.	Karte der Risikogebiete auf Basis der BÜK 50 keine flächenbezogenen Angaben zum Status
EEA	2007	Osteuropa	expertengestützt	k. A.	van Lynden (1993) EECCA Region; Ukraine 40 % der Fläche, Russische Föderation > 25 % der Landwirtschaftsfläche
Heesmans	2007	Niederlande	Übersichtsartikel		Zitat: „There is not much quantitative information about compaction of soils in the Netherlands. There is almost no knowledge of the regional distribution of compaction as such nor is there a clear insight in trends“.

Fortsetzung Übersicht 1

Autor	Jahr	Region	Methode / Projekt	Klassen	Angaben der degradierten Fläche in % oder ha bzw. die in der Publikation angeführte Literatur
defra [Project code SID5] final report	2008	England and Wales	Risk of compaction = Vulnerability of the soils + stress factors	3	Grünland Risk of soil compaction map for all areas of grassland [severe 1 %, high 21 %, moderate 60 %]
Lorenz	2008	BRD und Bundesländer	Übersichtsartikel Literaturoauswertung	k. A.	keine flächenbezogenen Angaben zum Status; Hinweise auf Auswertungen für einzelne Bundesländer;
Brandhuber	2008	Bayern	Gefügeuntersuchung für Zeitraum 1995 bis 2003	k. A.	Zitat: „Keine Hinweise auf in nennenswertem Umfang schädlich verdichtete Unterböden von Ackerland“.
Montanarella	2008	Europa			van Camp et al. (2004), Crescimanno et al. (2004), van Ouwerkerk & Soane (1995)
Houskava & Montanarella	2008	Europa			Zitat: „Real status of soil's compaction was not subject of this study because of the lack of actual data and because of non stable character of such threat“.
SoCo-project team	2009	Europa			van Lynden (1993)
Godwin et al.	2009	England			keine flächenbezogenen Angaben zum Status
defra	2009	England			keine flächenbezogenen Angaben zum Status
Schjønning et al.	2009	Dänemark	Systematische Auswertung der aktuellen Forschung in Dänemark		Zitat: „The degree of compaction of Danish arable soils has not been subjected to systematic monitoring. However, evidence exists that Danish soils generally have dense parts in the soil profile that can be related to the compaction effect of machinery“.
Murer	2009	Österreich	Vorbelastung [Schätzung nach DIN 19688; 30 bis 35 cm Tiefe]	5	Zitat: „Mehr als die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs besitzt eine hohe bis sehr hohe Vorbelastung, etwa ein Drittel besitzt eine mittlere Vorbelastung und ca. 10 % der Ackerflächen eine geringe Vorbelastung. Nur zweieinhalb Prozent der in der Landwirtschaft genutzten Böden haben eine sehr geringe potentielle Vorbelastung“.
Hack-ten Broeke et al.	2009	Niederlande	Vulnerability	3	keine Angaben zum landesweiten Status
van Akker & Hoogland	2009	Niederlande	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibility • Vulnerability • Compression strength • Maximal allowable wheel load • Overcompacted area 	3 3 4 4	Karte 1:250.000 Bodenkarte der Niederlande Schätzung Zitat: „If the map with estimated overcompacted subsoils is really true, the about 50 % of the best and most fertile agricultural soils of the Netherlands have an overcompacted subsoil. This would be a very worrying situation and must be verified“.
Bakker et al.	2010	Niederlande			keine Angaben zum landesweiten Status
Lebert	2010	Deutschland	Gefügeeigenschaften	5	BÜK 1000 N der BGR bundesweiter Status Gefügeeigenschaften Unterböden Acker - Flächenanteil: ungünstig 38 %; sehr ungünstig 8 %

3 Schätzung der Verdichtungsempfindlichkeit – expertengestützt bzw. auf Basis von Pedotransferfunktionen und Modellen

Da eine Ausweisung von Risikogebieten auf Grund von Messdaten in vielen Ländern kaum möglich sein dürfte, bleibt die Möglichkeit, sie expertengestützt unter Berücksichtigung der in der BSRRRL angeführten Kriterien oder durch den Einsatz von Modellen flächenhaft auszugrenzen und darzustellen.

In den letzten Jahren wurden bereits mehrere Ansätze zur Schätzung der Verdichtungsempfindlichkeit (susceptibility) der Unterböden, zur Befahrbarkeit, zur Tragfähigkeit, zur Vorbelastung, zur Abschätzung der Zeiträume mit günstigem Wasserhaushalt im Unterboden während der Phasen der Bodenbearbeitung sowie zur Verdichtungsgefährdung (vulnerability) der Unterböden entwickelt. Eine vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Ansätze, vor allem in Hinblick auf ihre Eignung zur Ausweisung von Risikogebieten, steht allerdings noch aus. Übersicht 2 gibt eine Beschreibung welche Ansätze den Autoren bekannt sind. Eine Validierung der Verfahren im Sinne der Vorgaben der BSRRRL ist uns aber bisher für keinen dieser Ansätze bekannt.

Die Zusammenstellung der Übersicht 2 zeigt, dass seit Mitte der 90er Jahre eine Vielzahl von Ansätzen vorgestellt wurden, mit denen verdichtungsgefährdete Regionen in Europa ausgewiesen werden könnten. Aus heutiger Sicht dürften sich allerdings grundsätzlich nur diejenigen Ansätze durchsetzen, welche zumindest die drei wesentlichen, die Bodenverdichtung bestimmenden, Größen berücksichtigen (Le Bas et al., 2006, van den Akker & Simota, o. J.). Hierbei handelt es sich um:

- a) die Intensität der mechanischen Beanspruchung auf den Boden (bestimmt u. a. durch die Art der Nutzung, die eingesetzte Technik und die Intensität der Bewirtschaftung),
- b) die Bodeneigenschaften (u. a. den aktuellen Gefügezustand, die Ausprägung bereits vorhandener Verdichtungen, der Standortwasserhaushalt, die Stabilität des Bodens gegenüber zusätzlichen mechanischen Belastungen)
- c) das lokale Klima (Dauer von Phasen mit ungünstigem Wasserhaushalt) zu den verschiedenen Zeitpunkten einer mechanischen Beanspruchung (Bestellung, Pflege, Ernte) des Bodens.

Mit den Arbeiten von Le Bas et al. (2006), Jones et al. (2008) sowie Lebert (2010) liegen erste methodische Ansätze vor, Gebiete auszuweisen, in denen ungünstige Bodeneigenschaften in Kombination mit ungünstigen klimatischen Bedingungen eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen hervorrufen könnten. Für eine Ausweisung von Risikogebieten müssten diese Grundlagen aber

noch mit Informationen zur bewirtschaftungsbedingten mechanischen Beanspruchung der Unterböden in diesen Regionen verknüpft werden. Dieses ist sinnvoll, da eine Vielzahl von Vorsorgemaßnahmen zum Schutz des Bodengefüges gerade eine Minimierung bzw. günstige Verteilung der mechanischen Bodenbelastung zum Ziel hat. Für die meisten Regionen dürften aber die dafür benötigten Informationen kaum verfügbar sein. Selbst wenn für potenzielle Risikogebiete die benötigten Daten in ausreichender Qualität vorliegen würden, dürfte die alleinige Verknüpfung dieser Daten mittels Modellen oder Pedotransferfunktionen sehr wahrscheinlich nicht ausreichen, Risikogebiete im Sinne der BSRRRL auszuweisen. Gemäß der BSRRRL müssten nämlich „stichhaltige Beweise vorliegen oder ein begründeter Verdacht bestehen, dass eine Verschlechterung der Bodenqualität durch Verdichtung eingetreten ist bzw. in naher Zukunft eintreten könnte“ (COM(2006) 232 final).

Stichhaltige Beweise wären entsprechende repräsentative Messdaten mit regionaler und nicht nur lokaler Gültigkeit. Die liegen aber für größere zusammenhängende Gebiete mit unterschiedlichen Böden nicht vor. Bliebe die Herleitung eines „begründeten Verdachts“ durch den Einsatz von Modellen. Diese wiederum wären gemäß der BSRRRL an unabhängigen Daten zu validieren. Letzteres wurde aber nach Kenntnis der Autoren für die in Übersicht 2 angeführten Ansätze für größere regionale Einheiten bisher ebenfalls nicht durchgeführt.

Übersicht 2:

Verfahren zur Ausweisung von Verdichtungsempfindlichkeit bzw. Verdichtungsgefährdung der Unterböden ackerbaulich genutzter Standorte

Autor	Jahr	Ansatz	„Kennwert“	Parameter	Klassen	Region / Karte
Voorhees	1987	expertengestützt	susceptibility	Soil and climate data		
Fraters	1996	expertengestützt	vulnerability	General Soil Groups, Bodenklassen	4	Generalisierte Bodenkarte von Europa
van den Akker	1997	Pedotransferfunktionen [Modell] SOCOMO	Wheel-load bearing capacity	Soil strength	4 10 bis 15 kN, 16 bis 21 kN, 22 bis 27 kN, 28 bis 33 kN;	Bodenkarte der Niederlande 1 : 50.000
Jones et al.	2000	expertengestützt	vulnerability	Kreuztabelle susceptibility (4 Klassen) in Verbindung mit Klimadaten (5 Klassen)		Keine Karte
Erhard et al.	2002	Pedotransferfunktionen	Verdichtungsgefährdung	Kombination aus Vorbelastungsstufe (nach DIN 19688) und Spurflächensumme als Indikator für die mechanische Belastung	5 nominal	BÜK 1000 der BGR
Jones	2002	expertengestützt	susceptibility	Kreuztabelle Körnung (nach FAO (5 Klassen)) in Verbindung mit effektiver Lagerungsdichte (3 Klassen)	4	Karte European Soil Database
Jones et al.	2003	expertengestützt	inherent susceptibility	Kreuztabelle Körnung (nach FAO (5 Klassen)) in Verbindung mit effektiver Lagerungsdichte (3 Klassen)	4 low 20 % moderate 44 % high 28 % very high 9 %	Bodenkarte von Europa 30 Referenzbodengruppen
Jones et al.	2003	expertengestützt	vulnerability	Kreuztabelle susceptibility (4 Klassen) in Verbindung mit Klimadaten (5 Klassen)	4	Keine Karte
Jones et al.	2004	expertengestützt	susceptibility			Bodenkarte von Europa 30 Referenzbodengruppen
Horn et al.	2005	Pedotransferfunktionen [Modell]	Vorbelastung	Vorbelastung	5	BÜK 1000 der BGR
le Bas	2006		Risk assessment	• Stress characterisation • Soil sensitivity • Period of critical soil wetness		
Varallyay	2006	k. A.	susceptibility	k. A.	5	Bodenkarte von Ungarn
van den Akker & Simota	o. J.	Pedotransferfunktionen [Modell] SIDASS	Vorbelastung	Vorbelastung	5	
Houskova & Montanarella	2008a 2008b	expertengestützt Pedotransferfunktionen Verknüpfungsregeln	natural susceptibility of soils to compaction [agricultural soils]	Referenzbodengruppe, Textur, Wasserhaushalt, Nutzung, Durchwurzelbarkeit	4	Bodenkarte von Europa 30 Referenzbodengruppen
Jones et al.	2008	ENVASSO V	Inherent susceptibility	Kreuztabelle Körnung (nach FAO (5 Klassen)) in Verbindung mit effektiver Lagerungsdichte (3 Klassen)	4	keine Karte, nur Methodenbeschreibung
Jones et al.	2008	ENVASSO V	vulnerability	Kreuztabelle susceptibility (4 Klassen) in Verbindung mit Klimadaten (5 Klassen)	4	keine Karte, nur Methodenbeschreibung

Fortsetzung Übersicht 2

Autor	Jahr	Ansatz	„Kennwert“	Parameter	Klassen	Region / Karte
Lebert	2008	Pedotransferfunktionen [Modell]	Verdichtungsempfindlichkeit	Kehrwert der Vorbelastung	5	BÜK 1000 N der BGR
Lebert & Marahrens	2009	Pedotransferfunktionen [Modell]	susceptibility	Kehrwert der Vorbelastung	5	BÜK 1000 N der BGR
Lebert & Marahrens	2009	Pedotransferfunktionen [Modell]	vulnerability	Kreuztabelle aus susceptibility und Gefügezustand	5	BÜK 1000 N der BGR
Lebert	2010	Pedotransferfunktionen [Modell]	„Tatsächliche Verdichtungsgefährdung“	Kreuztabelle aus Verdichtungsempfindlichkeit und Gefügezustand	5	BÜK 1000 N der BGR

4 Zusammenfassung

So wie sich die Situation für Deutschland im Moment darstellt, dürfte es für größere Regionen nur sehr schwer gelingen, ein „Risikogebiet Bodenverdichtung“ gemäß den Vorgaben der BSRLL auszuweisen. Da im Prinzip aber jeder Boden verdichtungsempfindlich ist und eine entsprechende Faktorenkonstellation in jedem Boden eine nachhaltige Beeinträchtigung der Funktionen durch Bodenverdichtung hervorrufen kann, sollte im Moment der Schwerpunkt vor allem auf die Vorsorge gegen Bodenverdichtung gelegt werden, z. B. durch eine entsprechende Präzisierung der „Guten fachlichen Praxis“. Weiterhin sollte dafür Sorge getragen werden, dass bodenschonende Bewirtschaftungsverfahren nicht nur erforscht und entwickelt werden, sondern durch den gezielten Einsatz staatlicher Fördermittel auch eine weite Verbreitung in der Praxis finden. Externe Kosten, die als Folge unsachgemäßer Bodenbewirtschaftung anfallen, sollten gemäß dem Verursacherprinzip tatsächlich den Pflichtigen in Rechnung gestellt werden. Geht es um die Bündelung von Maßnahmen in zusammenhängenden Regionen, dann bietet theoretisch §21 des BBodSchG bereits jetzt entsprechende Möglichkeiten. Hiervon müssten die Bundesländer allerdings Gebrauch machen.

5 Literatur:

Bakker G, Hack-ten Broeke MJD, de Vries F, van den Akker JJH (2010) Basismateriaal voor eventuele prioritair gebieden : quick scan voor Drenthe [online]. Zu finden in <<http://content.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterra-rapporten/AlterraRapport1964.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]

Berli M, Weisskopf P, Schulin R (1999) Subsoil compaction of agricultural soils : a review of research in Switzerland. In: Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (eds) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community : proceedings of the workshop of the Concerted Action “Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction”, 28–30 May 1998, Wageningen, the Netherlands. Wageningen : DLO-Staring Centre, pp 56-63

Brandhuber R (2008) Status der Bodenverdichtung in Bayern. In: Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf : Tagungsband zur Fachveranstaltung von ILU, GKB und KTBL am 5. und 8. Dezember 2007 in Bonn. Bonn : Inst Landwirtsch Umwelt, Schriften Inst Landwirtsch Umwelt 15:47-56

Chamen WCT, Spoor G (1999) Subsoil compaction in England and Wales. In: Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (eds) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community : proceedings of the workshop of the Concerted Action “Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction”, 28–30 May 1998, Wageningen, The Netherlands. Wageningen : DLO-Staring Centre, pp 77-85

COM – European Commission (2002) Towards a thematic strategy for soil protection : COM(2002)179 final [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0179:FIN:EN:PDF>> [zitiert am 27.01.2011]

COM - European Commission (2005) Key Threats to soil in Europe - Compaction. In: Soil Atlas of Europe [Online]. Zu finden in <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/soil_atlas/download.cfm?myID=115> [zitiert am 28.01.2011]

COM - European Commission (2006a) Thematic strategy for soil protection : COM(2006)231 final [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0231:FIN:EN:PDF>> [zitiert am 16.12.2010]

COM - European Commission (2006b) Proposal for a directive of the European parliament and the council establishing a framework for the protection of soil and amending directive 2004/35/EC : COM(2006)232 final [online]. Zu finden in <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/com_2006_0232_en.pdf> [zitiert am 16.12.2010]

Crescimanno G, Lane M, Owens PN, Rydel B, Jacobsen OH, Düwel O, Böken H, Berenyi-Üveges J, Castillo V, Imeson A (2004) Links with organic matter and contamination working group and secondary soil threats [online]. Zu finden in <<http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/vol2.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]

defra – Department for Environment, Food and Rural Affairs (2004) The First Soil Action Plan for England : 2004-2006 [online]. Zu finden in <<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20081023133800/http://www.defra.gov.uk/environment/land/soil/pdf/soilactionplan.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]

defra – Department for Environment, Food and Rural Affairs (2008) Scoping study to assess soil compaction affecting upland and lowland grassland in England and Wales [online]. Zu finden in <<http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&ProjectID=14699&FromSearch=Y&Publisher=1&SearchText=bd2304&SortString=ProjectCode&SortOrder=Asc&Paging=10>> [zitiert am 14.12.2010]

- defra – Department for Environment, Food and Rural Affairs (2009) Safeguarding our soils : a strategy for England [online]. Zu finden in <<http://www.defra.gov.uk/environment/quality/land/soil/documents/soil-strategy.pdf>> [zitiert am 16.12.2010]
- Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibblewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Toth T, Varallyay G, Halla MY, Zupan M (2006) Common criteria for risk area identification according to soil threats. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, 94 p, European Soil Bureau Research Report 20, EUR 22185 EN
- EEA – European Environment Agency (1995) Soil. In: Europe's environment : the DOBRI- assessment ; chapter 7 [online]. Zu finden in <<http://www.eea.europa.eu/publications/92-826-5409-5/page007new.html>> [zitiert am 16.12.2010]
- EEA - European Environment Agency (2003) Soil degradation. In: Europe's environment : the third assessment ; chapter 9. [online]. Zu finden in <http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_assessment_report_2003_10/kiev_chapt_09.pdf> [zitiert am 16.12.2010]
- EEA – European Environment Agency (2007) Soil. In: Europe's environment : the fourth assessment ; chapter 2.4 [online]. Zu finden in <http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2007_1/chapter2.pdf> [zitiert am 16.12.2010]
- Erhard M, Everink C, Christian J, Kreins P, Sietz D, Meyer J (2002) Bundesweite Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Agrarstatistikdaten und aktuellen Daten zur Bodennutzung [online]. Zu finden in <<http://www.umwelt-daten.de/publikationen/fpdf-l/2237.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]
- EUA – Europäische Umweltagentur (1998) Die Umwelt in Europa : der zweite Lagebericht ; Bodendegradation (Kapitel 11) [online]. Zu finden in <<http://www.eea.europa.eu/de/publications/92-828-3351-8/11de.pdf>> [zitiert am 16.12.2010]
- EUA – Europäische Umweltagentur (2002) Auf dem Boden der Tatsachen : Bodendegradationen und nachhaltige Entwicklung in Europa [online]. Zu finden in <http://www.eea.europa.eu/de/publications/Environmental_issue_series_16> [zitiert am 16.12.2010]
- Fraters B (1996) Generalized soil map of Europe : aggregation of the FAO-Unesco soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes [online]. Zu finden in <<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/481505006.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]
- Godwin R, Spoor G, Finney B, Hann M, Davies B (2009) The current status of soil and water management in England [online]. Zu finden in <<http://www.rase.org.uk/what-we-do/publications/Soils-Full-Report.pdf>> [zitiert am 14.12.2010]
- Görlach B, Landgrebe-Trinkunaite R, Interwies E (2004) Assessing the economic impacts of soil degradation : final report ; vol I: Literature review [online]. Zu finden in <http://ecologic.eu/download/projekte/1950-1999/1962/1962_soil_economics_1_lit_review.pdf> [zitiert am 14.12.2010]
- Hack-ten Broeke MJD, van Beek CL, Hoogland T, Knotters M, Mol-Dijkstra JP, Schils RLM, Smit A, de Vries F (2010) Kaderrichtlijn bodem : basismateriaal voor eventuele prioritair gebieden [online]. Zu finden in <<http://edepot.wur.nl/137524>> [zitiert am 14.12.2010]
- Heesmans H (2007) Bibliography on current risk assessments in EU [online]. Zu finden in <<http://www.ramsoil.eu/NR/rdonlyres/92E3BE6B-5CE9-48E3-A9C3-4D62F1E45CDC/43250/PR11BibliographyonCurrentRiskAssessmentsinEU.pdf>> [zitiert am 16.12.2010]
- Horn R, Wiermann C (1999) Input parameters for soil mechanical properties : theory and first approach. In: Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (eds) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community : proceedings of the workshop of the Concerted Action "Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction", 28.-30 May 1998, Wageningen, the Netherlands. Wageningen : DLO-Staring Centre, pp 132-155
- Horn R, Fleige H, Richter FH, Czyz EA, Dexter A, Diaz-Pereira E, Dumitru E, Enarche R, Mayol F, Rajkai K, de la Rosa D, Simota C (2005) SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. Soil Tillage Res 82:47-56
- Houšková B, Montanarella L (2008) The natural susceptibility of european soils to compaction. In: Toth G, Montanarella L, Rusco E (eds) Threats to soil quality in Europe. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, pp 23-35, JRC scientific and technical reports
- Houšková B, Montanarella L (2008b) The Natural Susceptibility of European Soils to Compaction [online]. Zu finden in <<http://eusoils.jrc.it/events/Conferences/Eurosoil2008/W54%209.20%20Montanarella.pdf>> [zitiert am 27.01.2011]
- Imeson A, Ritsema C, Hessel R (2004) Research for erosion, compaction, floods and landslides. In: Van-Camp L, Bujarrabal B, Gentile A-R, Jones RJA, Montanarella L, Olazabal C, Selvaradjou S-K (eds) Reports of the technical working groups established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, pp 725-740, EUR 21319 EN/6
- Jones RJA, Spoor G, Thomasson AJ (2000) Assessing the vulnerability of subsoils to compaction. Rapporter Jordbearbetningsavdelningen, Sveriges lantbruksuniversitet, 100:160-172
- Jones RJA (2002) Assessing the vulnerability of soil to degradation. In: Paglai M, Jones RJA (eds) Sustainable land management – environmental protection : a soil physical approach. Reiskirchen : Catena Verl, Adv in Geol 35: 33-44
- Jones RJA, Spoor G, Thomasson AJ (2003) Vulnerability of subsoils in Europe to compaction : a preliminary analysis. Soil Tillage Res 73:131-143
- Jones RJA, Verheijen FGA, Reuter HI, Jones AR (eds) (2008) Environmental assessment of soil for monitoring : vol V: Procedures and protocols [online]. Zu finden in <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/Envasso/documents/ENV_Vol-V_Final2_web.pdf> [zitiert am 15.12.2010]
- Kuhlmann T, Reinhard S, Gaaff A (2010) Estimating the cost and benefits of soil conservation in Europe. Land Use Policy 27:22-32
- Lawrence DG (1999) Aspects of soil protection as seen by the European Commission. In: Kraemer RA (ed) Soil protection policies within the European Union : workshop, 9-11 December 1998, Bonn, Germany. Bonn : Fed Ministry Environment, pp 345-366
- Le Bas C, Houskova B, Bialousz S, Bielek P (2006) Soil compaction : identifying risk areas for soil degradation in Europe by compaction. In: Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibblewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Toth T, Varallyay G, Halla MY, Zupan M (eds) Common criteria for risk area identification according to soil threats. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, pp 35-42, European Soil Bureau Res Rep 20, EUR 22185 EN
- Lebert M (2008) Herleitung und Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik Deutschland : Zwischenergebnisse aus dem UBA-Vorhaben: „Entwicklung eines Prüfkonzzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ FKZ 3707 71 202 – Entwurf [online]. Zu finden in <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlaeten/boden/downloads/verdichtung_bericht.pdf> [zitiert am 16.01.2010]
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden [online]. Zu finden in <<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4027.pdf>> [zitiert am 15.12.2010]
- Lebert M, Schäfer W (2005) Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz 2:42-46
- Lebert M, Schäfer W (2007) Vorstellung eines Regionalisierungsschlüssels zur Ausweisung von Risikoflächen für Bodenverdichtungen im Maßstab 1 : 50.000. Mitt Dt Bodenkdl Ges 110(2): 507-508
- Lebert M, Marahrens S (2009) Risk area identification according to soil compaction of agricultural soils in Germany : proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-013 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Lebert M, Marahrens S (2010) Ausweisung von Risikoflächen für Unterbödenverdichtungen. Tagungsband / Marktredwitzer Bodenschutztage 6:218-224
- Lee YH (2006) Probleme des nachhaltigen Bodenschutzes in Europa : Entwicklung, Eckpunkte, Stand der Diskussion und Perspektiven. In: Lee YH, Bückmann W (eds) Europäischer Bodenschutz : Schlüsselfragen des nachhaltigen Bodenschutzes. Berlin : Univ-Verl der TU, pp 15-66

- Lorenz M (2008) Status der Bodenverdichtung auf niedersächsischen Ackerböden und eine Übersicht der Verhältnisse in Deutschland. SchR Inst Landwirtsch Umwelt 15:57-70
- Montanarella L (2008) Current problems in soil protection in Europe. In: Lee YH, Bückmann W (eds) Europäischer Bodenschutz : Schlüsselfragen des nachhaltigen Bodenschutzes. Berlin : Univ.-Verl der TU, pp 67-80
- Murer E (2009) Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Petzenkirchen : Inst Kulturtechn Bodenwasserhaushalt, 35 p
- Oldemann LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG (1991) World map of the status of human induced soil degradation : an explanatory note. Wageningen : Internat Soil Reference Inform Centre, 34 p
- Römkens PFAM, Oenema O (eds) (2004) Quick scan soils in the Netherlands : overview of the soil status with reference to the forthcoming EU Soil Strategy. Wageningen : Alterra, Alterra-Rapport 948
- Schjønning P, Heckrath GJ, Christensen BT (2009) Threats to soil quality in Denmark : a review of existing knowledge in the context of the EU soil thematic strategy. Tjele : Aarhus Univ, Fac Agric Sci, 121 p
- Soane BD, van Ouverkerk C (1995) Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. Soil Tillage Res 35(1-2):5-22
- Soane BD, Van Ouverkerk C (1998) Soil compaction : a global threat to sustainable land use. Adv Geol 31(I):517-525
- SoCo Project Team (2009) Addressing soil degradation in EU agriculture : relevant processes, practices and policies : report on the project „Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo) [online]. Zu finden in <<http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/EUR-23767-web.pdf>> [zitiert am 16.12.2010]
- Van-Camp L, Bujarrabal B, Gentile A-R, Jones RJA, Montanarella L, Olazabal C, Selvaradjou S-K (eds) (2004) Reports of the technical working groups established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Luxembourg : Off Official Publ European Communities, 179 p, EUR 21319 EN/6
- Van den Akker JJH (1997) Construction of a wheel-load bearing capacity map of the Netherlands : Proceedings of the ISTRO 14th Conference held in Pulawy, Poland, July 27 – August 1, 1997, Bibliotheca Frag-menta Agronomica : vol 2A/97: 15-18
- Van den Akker JJH (2004) Soil compaction. In: Römkens PFAM, Oenema O (eds) Quick scan soils in the Netherlands : overview of the soil status with reference to the forthcoming EU Soil Strategy [online]. Zu finden in <<http://webdocs.alterra.wur.nl/pdffiles/alterraRapporten/rapport%20948.pdf>> [zitiert am 16.12.2010], pp 77–80
- Van den Akker JJH, Canarache C (2001) Two European concerted actions on subsoil compaction. Landnutzung Landentwickl 42(1):15-22
- Van den Akker JJH, Simota C (o.J.) Risk assessment methods of compaction : RAM-SOIL project report 2.3, deliverable 2.3.2.5 [online]. Zu finden in <http://www.ramsoil.eu/NR/rdonlyres/9179FD01-072A-449C-8EE4-CE1DC33DFF76/56724/PR23_compaction.pdf> Abfrage 03.08.2009> [zitiert am 16.12.2010]
- Van den Akker JJH, Hoogland T (2004) Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in the Netherlands : proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference held in Izmir, Turkey, June 15 – 19, 2009, T4-31 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 28.11.2010]
- Van Lynden GWJ (1993) The European soil resource : current status of soil degradation causes impacts and need for action. Strasbourg : Council of Europe Pr, 93 p, Nature Environment 71
- Van Lynden GWJ (2000) Soil degradation in Central and Eastern Europe : the assessment of the status of human-induced degradation (ver. 1.0) [online]. Zu finden in <http://www.isric.org/ISRIC/WebDocs/Docs/SOVEUR_Rep2000_05.PDF> [zitiert am 16.12.2010]
- Varallyay G (2006) Salinisation, Soil compaction, Soil sealing. In: Michel E, Panagos P, Jones, AR, Montanarella, L (eds) 3rd European Summer School on Soil Survey. Luxembourg : Off Official Publ European Communities EUR 22193 EN Chapter 6 12 p
- Voorhees WB (1987) Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. Soil Tillage Res 10:29–38
- Vorderbrügge T (1999) Regelungen und Informationsgrundlagen zum Bodenschutz in Europa. In: Beudt J (ed) Präventiver Grundwasser- und Bodenschutz : europäische und nationale Vorgaben. Berlin : Springer, pp 1-20
- WBGU (1993) Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen : Jahrestagungen 1993. Bonn : Economica Verl, 224 p
- WBGU (1994) Die Gefährdung der Böden : Jahrestagungen 1994. Bonn : Economica Verl, 278 p
- WBGU (2009) Welt im Wandel : zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Berlin : WBGU, 388 p
- Werner D, Petelkau H, Brandhuber R (1997) Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden und Lösungsansätze zum Bodengefigeschutz : Positionspapier der Fachgruppe Bodenspezialisten der Bundesländer im VDLUFA. Darmstadt, 12 p

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 Reifeninnendrucks.

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, Rheingaustr. 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 durchgeföhrten 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 Maschinen-einsatz 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 Krumenbasisverdichtung. Die gemessenen Verdichtungswerte führen die Autoren auf wiederholten Fahrverkehr durch ein absetziges Verfahren bei der Zuckerrübenernte oder auch auf eine „gewaltsam erzwungene Pflugfurche bei Nässe“ zurück.

Harrach et al. (2003) untersuchten langfristig nutzungsbedingte Bodendegradierungen (hier die Bodenerosion) 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 **Thüringen** 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 inwie weit 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 Zufahrtsbereich 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 Statuserhebung in **Südniedersachsen** 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.

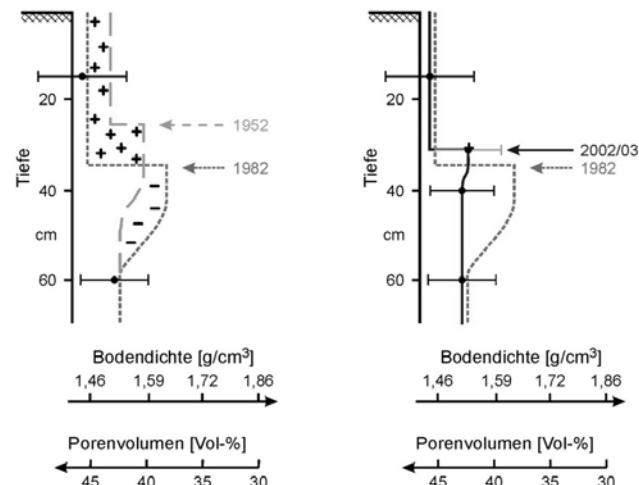


Abbildung 1:

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 Schlepperradsohlen 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 Krumenbasis 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 konservernder 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 Indikator system 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 Krumenbasis 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 Krumenbasisverdichtungen durch eine gewalt sam erzwungene Pflugfurche bei Nässe“ und die übrigen sechs Beiträge solche nur in Krumenbasen, auf Vorgewinden 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 durchgeföhrten 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 Bodenrinne**, 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 Bodenrinne 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. Bodendrücke 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 konservernde 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 (= Köpfrodebunker) 4-fach überrollt, ein Zustand, der am ehesten am Vorgewende vorzufinden ist, reduziert sich die gesättigte Wasserleitfähigkeit in Krumenbasis und Unterboden um 90 %. Dieser Einfluss war auf den Ertrag nicht signifikant. Die Tiefe der Verdichtung wurde mit dem Modell SOCOMO (= Soil COnpaction MOdel) berechnet und stimmte mit den gemessenen Werten recht gut überein,

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 Gütletankwagen und 6-reih. Köpfrodebunkern auf bindigen Böden keine gravierenden Veränderungen des Unterbodenengefüges nach, wenn bei der Bewirtschaftung die Regeln guter fachlicher Praxis eingehalten wurden. In einer anderen Untersuchung (Geischeder, 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 (= Boltingsonden) unter dem Band zeigten 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 sechsreihigen 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 Gütteselbstfahrer (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 Kontaktflächendruckes 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 Reiftabelle 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 Befahrsituation 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 Kontaktflächendruckes 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/cm³ 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 Bodendrücke 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, Krumenbasis 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 Statuserhebungen 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 Statuserhebungen 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 Statuserhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) übergegangen auf die Betriebsebene, da die Anpassung der Maschinenausstattung an den jeweiligen Standort nur betriebsspezifisch erfolgen kann.

Die seit 1995 durchgeföhrten eigenen Befahrungsversuche mit Einzelradmessvorrichtung, Traktoren, Ernte- und Transportmaschinen liefern die Grundlage für die Bewertung. Als Entscheidungsmatrix dient ein Quadrat raster 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.

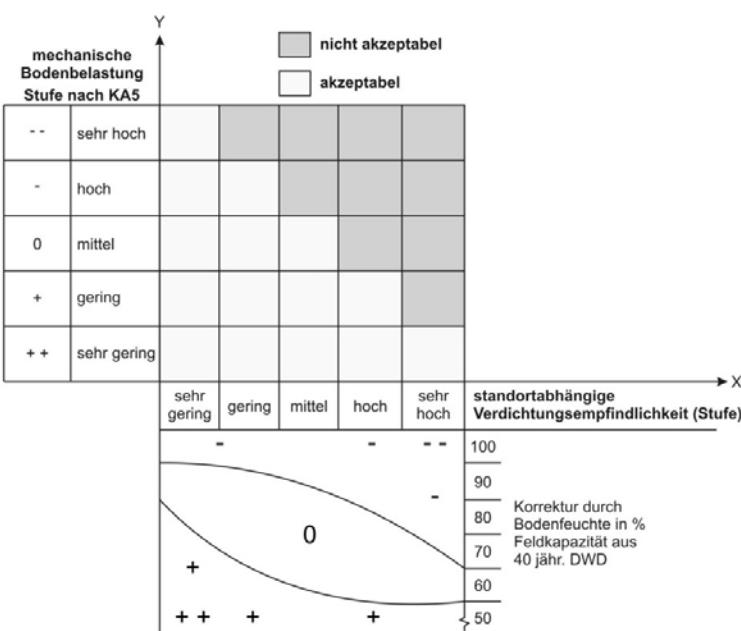


Abbildung 2:
Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit und mechanischer Bodenbelastung

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 Vorbela stungskonzept (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 vorsorgenden 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 cm² (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 Vor-gewende 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 „Silomaisernte“ und auch anderer Verfahrensketten. Hinter der Bewertung der Maschinen steht ein „Expertensystem“, dass sich auf ein 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 Bodendrücke 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 mit bewegen (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 eingesetzten Kraftmesszelle zur Messung des vertikalen Bodendruckes auch schon bei Feldversuchen zur Bodensetzung

(Trautner, 2003; Arvidsson & 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 Abbaizeiten 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, Trockenrohdichte, 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), Krumenbasis (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 Spurtdiefemessung. Eine Verknüpfung mit der Setzung erfolgt, indem die vertikale Fortbewegung der Spurtdiefe 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

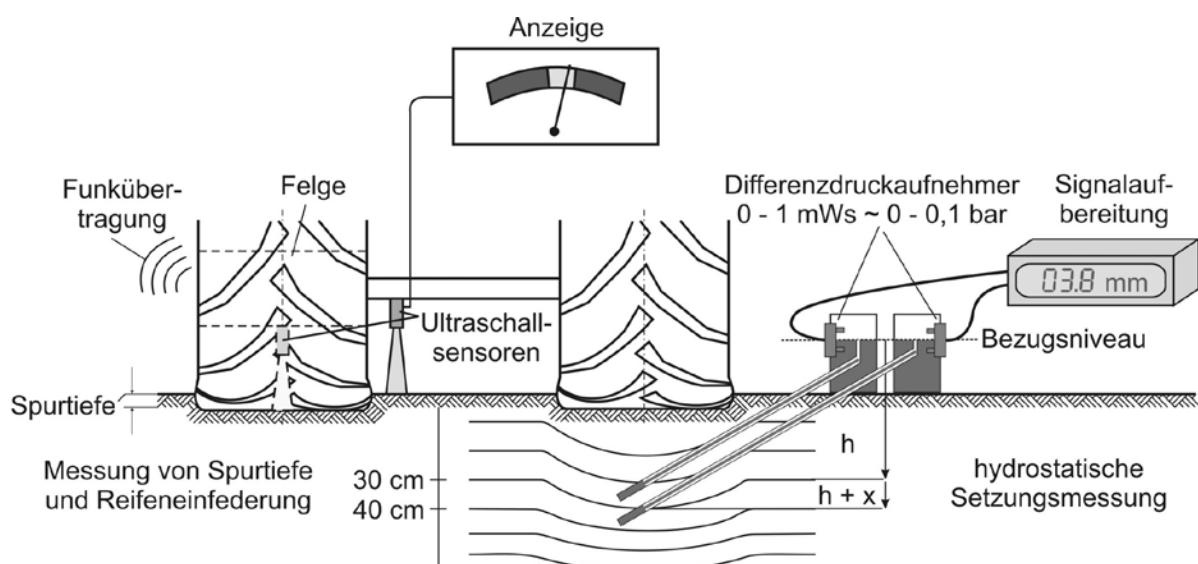


Abbildung 3:
hydrostatische Setzungsmessung und Multisensorsystem an landwirtschaftlichen Maschinen

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 Feldarbeitgeschwindigkeit 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 Befahrungsversuchen 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 Gesamtbela- stung 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-achsrig	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 m³	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 Reifeninnendrücke. 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 Reifeninnendrücke von maximal 3 bar auf 1,4 bar (Tridem-

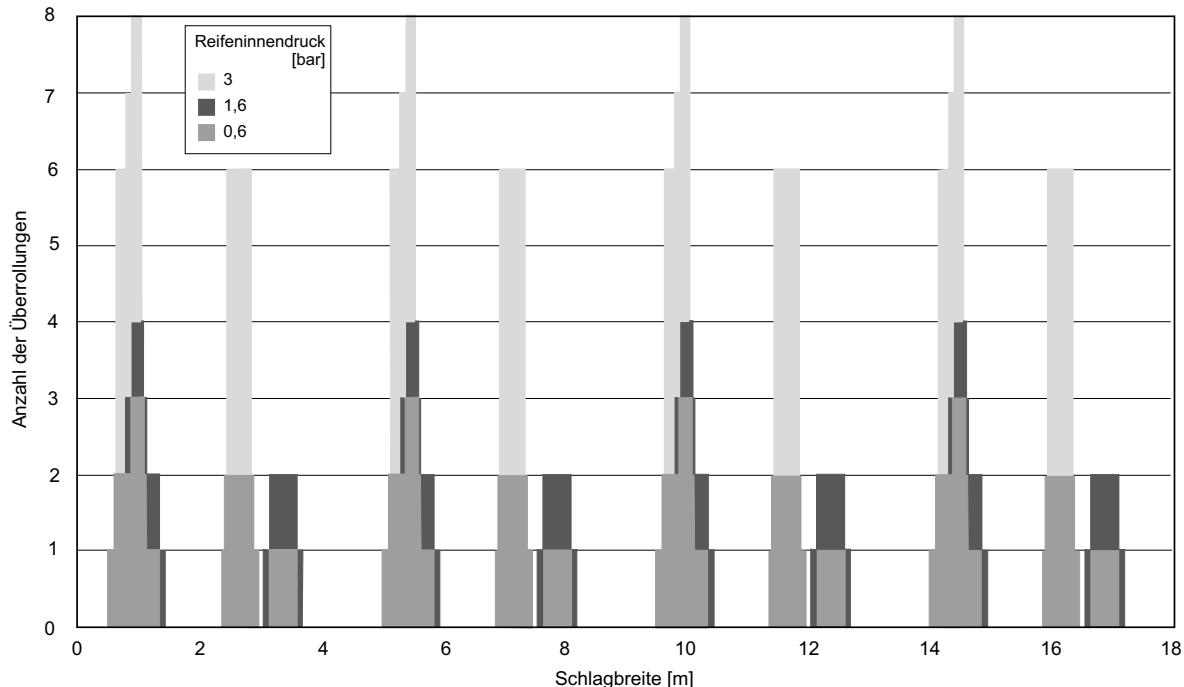


Abbildung 4:

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

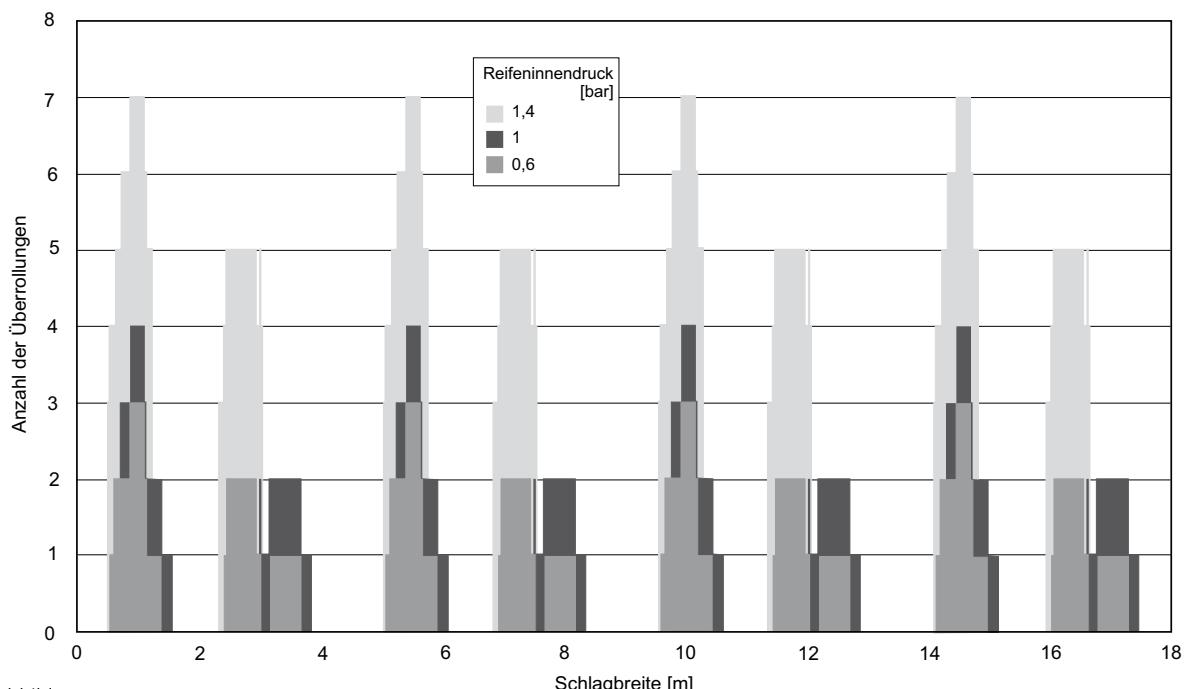


Abbildung 5:

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

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

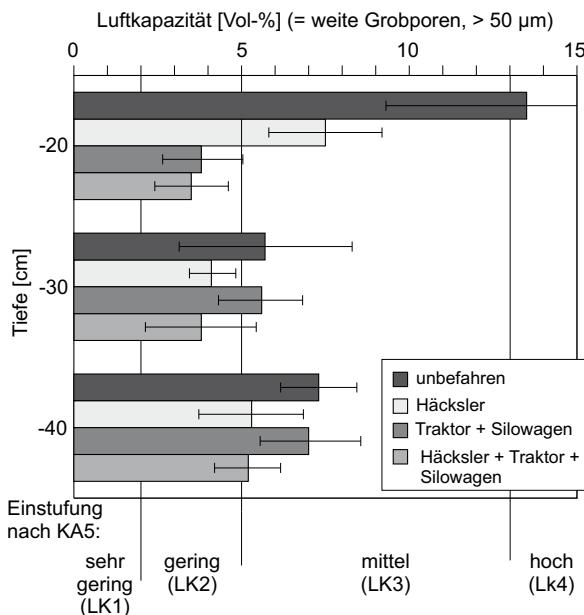


Abbildung 6:
Änderung der Luftkapazität durch Befahrung bei der Silomaisernte
(Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

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 Indikatorssystem nach Lebert et al, 2004 herausgegriffen: **Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit**. Der Feldgefügeansprache 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

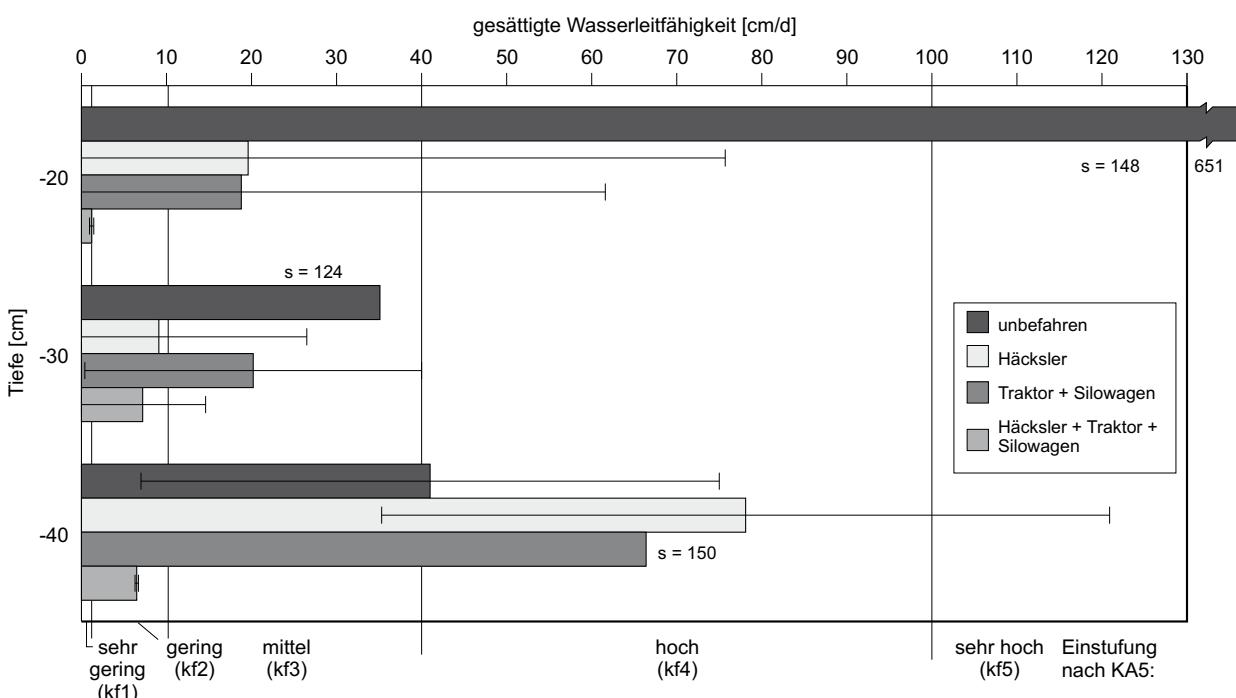


Abbildung 7:
Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernte (Ut 2-3, Löss, Oktober 2007)

Unterschiede zwischen den Belastungsvarianten erkennen. Bei der Wasserleitfähigkeit ist der Einfluss der Mehrfach-überrollung 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 Bodenstrukturering ausgefallen.

Die Befahrung von Häcksler und Silowagen in einer Spur haben bei Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit eine Minde rung 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 Silomaisernte 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 Krumenbasis 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 „Silomaisernte“ 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

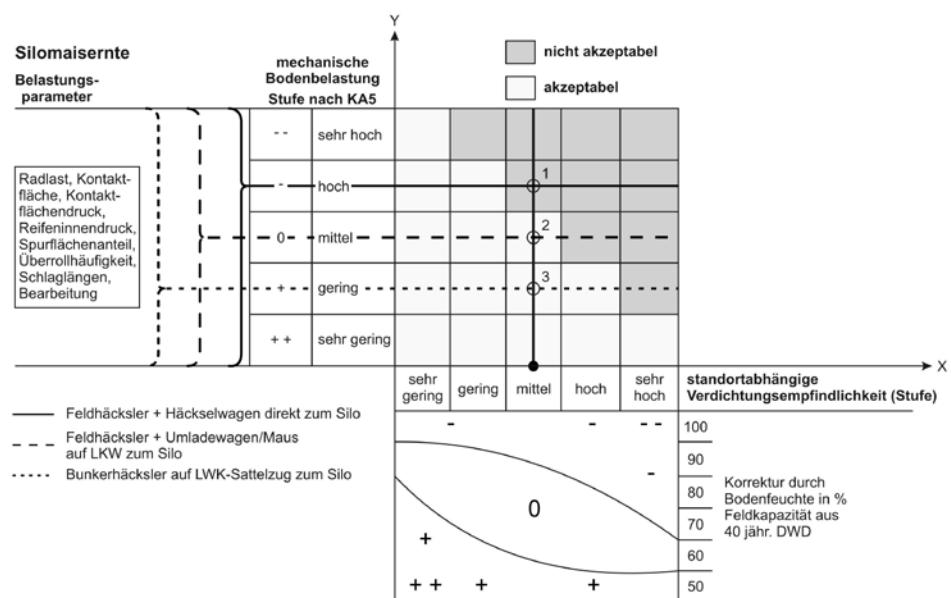


Abbildung 8:

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

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 Silomaisernte, 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 Reifeninnendrücken 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 Schlages 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 Silomaisernte „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.

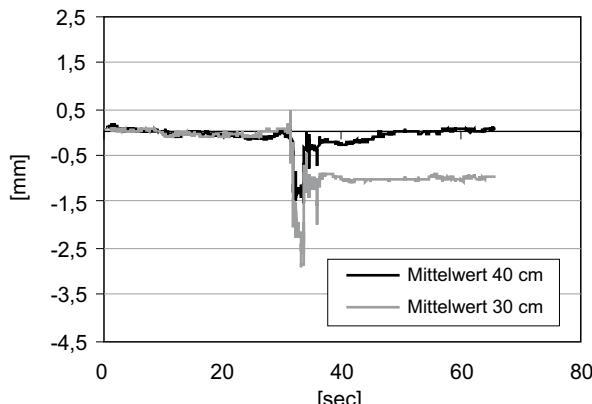


Abbildung 9:
Bodensetzung in 30/40 cm Bodentiefe bei Befahrung mit Feldhäcksler (Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

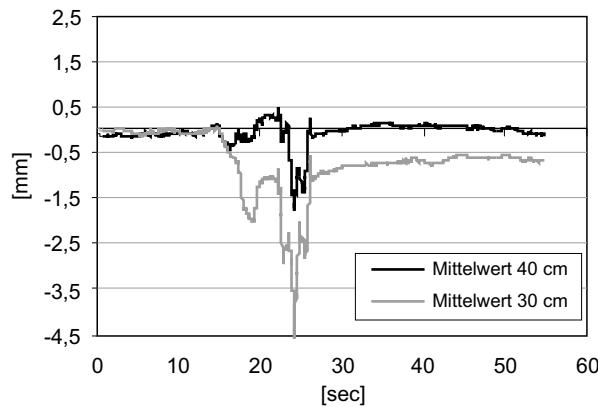


Abbildung 10:
Bodensetzung in 30/40 cm Bodentiefe bei Befahrung mit Traktor + Häckselselwagen (Tandem), (Ut 2 bis 3, Löss, Oktober 2007)

Um die Eignung der **Setzungsmessung als Feldkennwert** zu überprüfen, wird sie mit den Laborwerten Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit (siehe Abbildungen 6/7) verknüpft. Für den Unterbodenfugenschutz 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 Spurteufenmessung (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 Reifeninnendruck 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 Reifeninnendruck wird solange reduziert, bis der maximal zulässige Einfederungswert erreicht wird – damit hat eine Anpassung des Reifeninnendruckes an die reduzierte Radlast stattgefunden. Der maximal zulässige Einfederungswert eines Reifens ist keine Konstante, sondern eine Funktion des Reifeninnendrucks. Bei dem Traktorreifen 650/65 R 38 bewegt sich der maximale Einfederungswert z. B. für Reifeninnendrücke 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 Reifeninnendruck aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit auf dem Feld auf unter 1,5 bar abgesenkt werden kann. Ähnliche Beispiele lassen sich für Mähdrusch-, Kartoffel- und Rübenreiter entwickeln.

Zwischenfazit

Mit einer Anpassung der Fahrzeugparameter an den aktuellen Verdichtungszustand 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; Kreitmayer, 2009). Bei älteren Belastungsversuchen ist zu berücksichtigen, dass Diagonaleifen, die nur ein geringes Boden schonendes Potenzial entwickeln konnten, an Stelle der heute üblichen Radialreifen eingesetzt wurden.

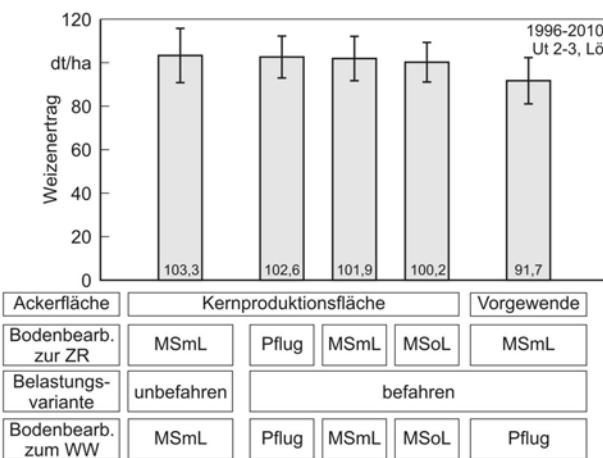


Abbildung 11:
Winterweizertrag nach Zuckerrüben, variiert nach mechanischer Belastung und Bodenbearbeitung (Ut 2 bis 3, Löss, 1996 bis 2010)

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 Weizertrag 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 krummentiefer 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 Weizertrag 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 krummentiefe 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 Vorgewebereich deuten auf eine Beeinträchtigung der Bodenstruktur im nahen Unterboden hin. Dieser Unterschied zeigt, dass die Zuordnung der mechanischen Belastung auf Teilbereiche des Ackerschlages 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 Gefügezustand 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 Spurriefenmessung nicht möglich, um einzelne Fahrzeugparameter und ganze Verfahrensketten an kritische Bodenfeuchtigkeitszustände anzupassen 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).

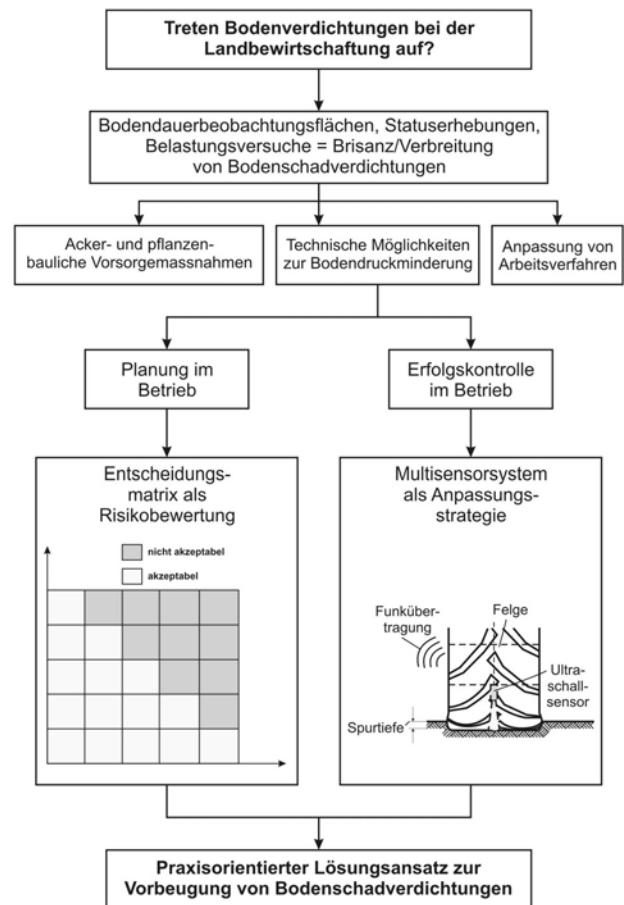


Abbildung 12:

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, erkennen 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
- Arvidsson 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
- Arvidsson J, Trautner A, Keller T (2002) Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. Adv Geocol 35:331-338
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JJH, Schjønning 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 Agrotech 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 SchrifR 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, Merkbl DLG 344
- Brandhuber R, Schäfer-Landefeld L, Koch H-J, Stockfisch N (2001) Sind heute übliche Fahrzeugmassen bei Rübenernte und Gülleaushubung 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 Völkenrode 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) Befahrbarkeitsensor : flexibles Einsatzmanagement und Bodenschonung während der Ernte. Zuckerrübe 56(5):246-249
- Brunotte J, Sommer C, Isensee E, Lorenz M, Nolting K, Höltkemeyer 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 : abgesenkter 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 Völkenrode 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, Chittrey 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, Tijink 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 Ackerböden. 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 Informations 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.ttl.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 Ländertwickl 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
- Geischeder R (2008) Bodenverdichtung unterschiedlicher Fahrwerke bei der Zuckerrübenernte : Forschungsergebnisse zu einem aktuellen Bodenschutzthema. 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-Bodenschutzgesetz. 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.ttl.de/ainfo/pdf/bods1008.pdf>> [zitiert am 28.01.2011]
- Gysi M (2001) Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß. Tänikon : 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, Enarche 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 Landwirtsch 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
- Kreitmayer 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> [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, SchrifR Inst Pflanzenernähr BodenkD Univ Kiel 39
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzepzes 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 Minister Landwirtsch 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-Forstwirtsch 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> [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-Boden gefügen. Göttingen : Cuvilier, 301 p
- Sommer C, Brunotte J, Ortmeier B (2001) Bodenverdichtung : Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. Zuckerrübe 50(6):364-371
- Sommer C, Ruhm E, Altermüller H-J (1981) Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. Kali-Briefe 15(7):429-448
- Stahl H, Marschall K, Götz H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Dresden : LfL, 127 p, SchrifR Sächsischen Landesanst Landwirtsch 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 JJH (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 JJH, Arvidsson J (eds) Subsoil compaction : distribution, processes and consequences. Reiskirchen : Catena-Verl, 462 p, Adv Geocoll 32
- Voßbrink J (2005) Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. Kiel : Inst Pflanzenern BodenkD, 107 p, SchrifR Inst Pflanzenernähr 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 Ackerstände. Kiel : Inst Pflanzenern BodenkD, 215 p, SchrifR 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	Bundesforschungsanstalt 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	Kontaktfächendruck
Koh.	Kohäsion
KOM	Kommission der Europäischen Gemeinschaften
kPa	Kilo Pascal (Pascal = Einheitsname für Druck)
KRB	Köpfrodebunker
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 ²	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	Lehm-sande
lt	Lehm-tone
lu	Lehm-schluffe
sl	Sand-lehme
ss	Rein-sande
su	Sand-schluffe
tl	Ton-lehme
tu	Ton-schluffe
us	Schluff-sande
ut	Schluff-tone

Bodenartenuntergruppen:

Ss	reiner Sand
St	toniger Sand
Sl	lehmiger Sand

Su	schluffiger Sand
Ut	toniger Schluff
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

Lieferbare Sonderhefte / Special issues available

309	Hans Marten Paulsen und Martin Schochow (Hrsg.) (2007) Anbau von Mischkulturen mit Ölpflanzen zur Verbesserung der Flächenproduktivität im ökologischen Landbau – Nährstoffaufnahme, Unkrautunterdrückung, Schaderregerbefall und Produktqualitäten	9,00 €
310	Hans-Joachim Weigel und Stefan Schrader (Hrsg.) (2007) Forschungsarbeiten zum Thema Biodiversität aus den Forschungseinrichtungen des BMELV	13,00 €
311	Mamdoh Sattouf (2007) Identifying the Origin of Rock Phosphates and Phosphorus Fertilisers Using Isotope Ratio Techniques and Heavy Metal Patterns	12,00 €
312	Fahmia Aljml (2007) Classification of oilseed rape visiting insects in relation to the sulphur supply	15,00 €
313	Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2007) Rinderzucht und Rindfleischerzeugung – Empfehlungen für die Praxis	10,00 €
314	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2007) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau, Schwerpunkt: Pflanze	12,00 €
315	Andreas Tietz (Hrsg.) (2007) Ländliche Entwicklungsprogramme 2007 bis 2013 in Deutschland im Vergleich – Finanzen, Schwerpunkte, Maßnahmen	12,00 €
316	Michaela Schaller und Hans-Joachim Weigel (2007) Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung	16,00 €
317	Jan-Gerd Krentler (2008) Vermeidung von Boden- und Grundwasserbelastungen beim Bau von Güllelagern Prevention of soil and groundwater contamination from animal waste storage facilities	12,00 €
318	Yelto Zimmer, Stefan Berenz, Helmut Döhler, Folkhard Isermeyer, Ludwig Leible, Norbert Schmitz, Jörg Schweinle, Thore Toews, Ulrich Tuch, Armin Vetter, Thomas de Witte (2008) Klima- und energiepolitische Analyse ausgewählter Bioenergie-Linien	14,00 €
319	Ludger Grünhage und Hans-Dieter Haenel (2008) Detailed documentation of the PLATIN (PLAnt-ATmosphere Interaction) model	10,00 €
320	Gerold Rahmann und Ulrich Schumacher (Hrsg.) (2008) Praxis trifft Forschung — Neues aus der Ökologischen Tierhaltung 2008	14,00 €
321	Bernd Degen (Editor) (2008) Proceedings of the international workshop “Fingerprinting methods for the identification of timber origins”, Bonn, October 8-9 2007	18,00 €
322	Wilfried Brade, Gerhard Flachowsky, Lars Schrader (Hrsg) (2008) Legehuhnzucht und Eiererzeugung - Empfehlungen für die Praxis	12,00 €
323	Christian Dominik Ebmeyer (2008) Crop portfolio composition under shifting output price relations – Analyzed for selected locations in Canada and Germany –	14,00 €
324	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2009) Calculations of Emissions from German Agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2009 for 2007 Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2009 für 2007	8,00 €
324A	Tables Tabellen	8,00 €

325	Frank Offermann, Martina Brockmeier, Horst Gömann, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Petra Salamon (2009) vTI-Baseline 2008	8,00 €
326	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2009) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2008	8,00 €
327	Björn Seintsch, Matthias Dieter (Hrsg.) (2009) Waldstrategie 2020 Tagungsband zum Symposium des BMELV, 10.-11. Dez. 2008, Berlin	18,00 €
328	Walter Dirksmeyer, Heinz Sourell (Hrsg.) (2009) Wasser im Gartenbau Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Organisiert im Auftrag des BMELV	8,00 €
329	Janine Pelikan, Martina Brockmeier, Werner Kleinhanß, Andreas Tietz, Peter Weingarten (2009) Auswirkungen eines EU-Beitritts der Türkei	8,00 €
330	Walter Dirksmeyer (Hrsg.) (2009) Status quo und Perspektiven des deutschen Produktionsgartenbaus	14,00 €
331	Frieder Jörg Schwarz, Ulrich Meyer (2009) Optimierung des Futterwertes von Mais und Maisprodukten	12,00 €
332	Gerold Rahmann und Ulrich Schumacher (Hrsg.) (2009) Praxis trifft Forschung — Neues aus der Ökologischen Tierhaltung 2009	8,00 €
333	Frank Offermann, Horst Gömann, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Petra Salamon, Jürn Sanders (2010) vTI-Baseline 2009 – 2019: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland	10,00 €
334	Hans-Dieter Haenel (Hrsg.) (2010) Calculations of Emissions from German Agriculture - National Emission Inventory Report (NIR) 2010 for 2008 Berechnung der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft - Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2010 für 2008	12,00 €
335	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2010) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2009	8,00 €
336	Peter Kreins, Horst Behrendt, Horst Gömann, Claudia Heidecke, Ulrike Hirt, Ralf Kunkel, Kirsten Seidel, Björn Tetzlaff, Frank Wendland (2010) Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen im Bereich des landwirtschaftlichen Gewässerschutzes vor dem Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie in der Flussgebietseinheit Weser	22,00 €
337	Ulrich Dämmgen, Lotti Thöni, Ralf Lumpp, Kerstin Gilke, Eva Seitler und Marion Bullinger (2010) Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig	8,00 €
338	Janine Pelikan, Folkhard Isermeyer, Frank Offermann, Jürn Sanders und Yelto Zimmer (2010) Auswirkungen einer Handelsliberalisierung auf die deutsche und europäische Landwirtschaft	10,00 €
339	Gerald Schwarz, Hiltrud Nieberg und Jürn Sanders (2010) Organic Farming Support Payments in the EU	14,00 €
340	Shrini K. Upadhyaya, D. K. Giles, Silvia Haneklaus, and Ewald Schnug (Editors) (2010) Advanced Engineering Systems for Specialty Crops: A Review of Precision Agriculture for Water, Chemical, and Nutrient - Application, and Yield Monitoring	8,00 €
341	Gerold Rahmann und Ulrich Schumacher (Hrsg.) (2010) Praxis trifft Forschung — Neues aus der Ökologischen Tierhaltung 2010	8,00 €

Gutachtergremium *Editorial Board*



- Dr. Martin Banse, Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik, vTI
Dr. Jürgen Bender, Institut für Biodiversität, vTI
Dr. Jutta Berk, Institut für Tierschutz und Tierhaltung, FLI
Prof. Dr. Franz-Josef Bockisch, Institut für Anwendungstechnik, JKI
Dr. Herwart Böhm, Institut für Ökologischen Landbau, vTI
Prof. Dr. Andreas Bolte, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, vTI
Dr. Ulrich Dämmgen, Institut für Tierzucht und Vererbungsforschung, TiHo
PD Dr. Sven Dänicke, Institut für Tierernährung, FLI
Dr. habil. Bernd Degen, Institut für Forstgenetik, vTI
Dr. Matthias Dieter, Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, vTI
PD Dr. habil. Bettina Eichler-Löbermann, Universität Rostock
Dr. Peter Elsasser, Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, vTI
Prof. Dr. Andreas Fangmeier, Universität Hohenheim
PD Dr. Matthias Fladung, Institut für Forstgenetik, vTI
Prof. Dr. Heinz Flessa, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, vTI
Prof. Dr. Ulrike Grabski-Kieron, Universität Münster
PD Dr. Jörg-Michael Greef, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI
Prof. Dr. Konrad Hagedorn, Humboldt-Universität Berlin
PD Dr. Ingrid Halle, Institut für Tierernährung, FLI
Dr. Silvia Haneklaus, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI
Prof. Dr. Eberhard Hartung, Universität Kiel
Prof. Dr. Roland Herrmann, Universität Gießen
Prof. Dr. habil. Pierre Ibsch, Hochschule für nachhaltige Entwicklung, HNEE
Dipl. Ing.-Agr. Robert Kaufmann, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Schweiz
Dr. Jörg Kleinschmit, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Prof. Dr. Luit de Kok, Universität Groningen, Niederlande
Prof. Dr. Uwe Latacz-Lohmann, Universität Kiel
Dr. Oliver von Ledebur, Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik, vTI
Prof. Dr. Bernd Linke, Institut für Agrartechnik Bornim e.V.
Dipl. Met. Franz-Josef Lüpmeier, Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes
Prof. Dr. Udo Mantau, Universität Hamburg
Prof. Dr. Axel Munack, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, vTI
Dr. Hiltrud Nieberg, Institut für Betriebswirtschaft, vTI
Dr. Rainer Oppermann, Institut für Ökologischen Landbau, vTI
Prof. Dr. Herbert Oberbeck, TU Braunschweig
Dr. Jürgen Puls, Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, vTI
Prof. Dr. Gerold Rahmann, Institut für Ökologischen Landbau, vTI
Prof. Dr. Detlef Rath, Institut für Nutztiergenetik, FLI
Dr. Thomas Schneider, Institut für Weltforstwirtschaft, vTI
Prof. Dr. Dr. Ewald Schnug, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI
Dr. Lars Schrader, Institut für Tierschutz und Tierhaltung, FLI
Prof. Dr. Andreas Susenbeth, Universität Kiel
Prof. Dr. Friedhelm Taube, Universität Kiel
Prof. Dr. Klaus-Dieter Vorlop, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, vTI
Prof. Dr. Dr. habil. Drs. h.c. Gerd Wegener, TU München
Prof. Dr. Hans-Joachim Weigel, Institut für Biodiversität, vTI
Prof. Dr. Peter Weingarten, Institut für Ländliche Räume, vTI
Dr. Nicole Wellbrock, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, vTI



Johann Heinrich
von Thünen-Institut

Landbauforschung
*vTI Agriculture and
Forestry Research*

Vol. 61 No. 1 03.2011

Preis / Price 8 €

ISSN 0458-6859

