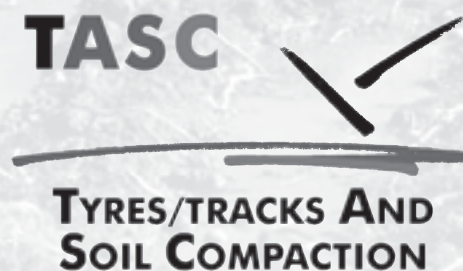


Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden

TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung

Etienne Diserens und Ernst Spiess, Agroscope FAT Tänikon, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon, CH-8356 Ettenhausen



TASC¹ ist eine praxistaugliche Excel-Anwendung der FAT vor allem für die Entscheidungsfindung bei der Konzeption, der Ausrüstung und dem Einsatz von Grossmaschinen- und -geräten für den Ackerbau. Mit numerischem und graphischem Output lässt sich die Bodenbeanspruchung durch Reifen- und Raupenfahrwerke, je nach den Fahrwerkparametern und den Bodeneigenschaften beurteilen. Eine mögliche Schadverdichtungsgefahr wird in den von den Auflockerungswerkzeugen nicht erfassten Zonen angezeigt. Anhand von mehr als zehn zwischen 1994 und 1999 durchgeführten Feldversuchen² auf bindigen (kohäsiven) Böden wurden die mathematischen Zusammenhänge (Algorithmen) für die Ermittlung der Kontaktfläche und für die Berechnung der Druckausbreitung im Bodenprofil abgeleitet und

in ein Modell integriert. Die technischen Angaben zur Bereifung können dabei von über 1000 gespeicherten Reifentypen aus der Forst- und Landwirtschaft angewählt und übernommen werden. Auf Grundlage der internationalen Reifen- und Felgenormen lässt sich auch die maximal zulässige Belastung je nach Bereifung, Reifeninnendruck und Fahrgeschwindigkeit berechnen. TASC ist somit auch ein nützliches Hilfsmittel für die Reifenauswahl, den -vergleich und die -abstimmung. Die Anwendung eignet sich vorwiegend für Bereifungen mit Traktion- oder Farmer-Profil auf abgesetzten bindigen Ackerböden mit einer verfestigten Pflugschle zwischen 20 und 25 cm. Das Hauptziel ist der präventive Schutz der Ackerböden gegen schwere reversible und irreversible Schadverdichtungen.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
TASC – Das Wichtigste in Kürze	2
Einzelelemente	4
Anwendungsbeispiele	5
Einschränkungen und Grenzen	7
Nachprüfung der Anwendung aufgrund von Versuchen	11
Schlussfolgerungen	12
Fachbegriffe	13
Literatur	14

¹ Ausgeschrieben in Deutsch: Reifen/Raupen und Bodenverdichtung

² In Zusammenarbeit mit Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau

Problemstellung

Zunehmende Lasten, höhere Bodenbeanspruchung

Seit der Mitte der 1980er Jahre hat die überbetriebliche Mechanisierung der Landwirtschaft im Zeichen der Rationalisierung ausserordentlich stark zugenommen. Die Leistungsfähigkeit der Feldmaschinen wurde extrem gesteigert, parallel dazu sind die Geräte-, Maschinen- und Traktorengewichte in früher kaum für möglich gehaltene Grössenordnungen angestiegen. Mit Radlasten bis über 11 t und Maximalgewichten um 60 t stehen etwa in der Zuckerrübenenernte die bisher schwersten Landmaschinen im Einsatz. Eine wirtschaftliche Nutzung von Grossmaschinen bedingt lange Arbeitszeiten bzw. hohe Auslastungen. Damit steigt die Gefahr, dass der Boden vermehrt auch unter ungünstigen Bedingungen (Feuchtigkeit) befahren wird. Der Bodenschutz bekommt einen zunehmend höheren Stellenwert, denn die Bodenverdichtungsgefahr in der Ackerkrume und im Unterboden steht heute wie nie zuvor im Vordergrund. Als Folge ist die Wasser-, Luft-, Nährstoff- und Wärmeversorgung oft nicht mehr optimal gewährleistet.

Bodenverdichtung führt zu erschwerter Wasserinfiltration, was die Häufigkeit und Schwere von Überschwemmungen begünstigt. In der Ebene und vor allem am Hang ist durch oberflächlichen Abfluss mit Erosionsschäden zu rechnen. Ausserdem sind Strukturveränderungen in Form von Verdichtungen im Unterboden schleichende, oft bleibende Schäden, die vor allem bei Witterungsextremen zum Ausdruck kommen und sich längerfristig negativ auf die Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit der Böden auswirken.

In der Schweiz wird in der Verordnung über die Belastung des Bodens im Bereich des physikalischen Bodenschutzes der Bodenverdichtung und Bodenerosion hohe Priorität beigemessen (Richtlinien sind in Vorbereitung). Das Vorsorgeprinzip steht bei der langfristigen Sicherung der Multifunktionalität des Bodens und damit dem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit im Vordergrund. Die Umsetzung bereitet bisher beträchtliche Probleme, da konkrete bzw. fallspezifische, fundierte Anweisungen und Anhaltspunkte in der landwirtschaftlichen Praxis fehlen. Hier steht die Problematik, dass der Boden ein heterogenes lebendiges Gebilde ist, welches stetigen Wechselwirkungen unterworfen ist.

fendaten ist entweder eine direkte Eingabe der Reifenabmessungen in Zentimetern oder aber eine Datenübernahme durch Anklicken aus den abgespeicherten Reifentabellen welche die Daten von über 1000 Reifentypen aus der Land- und Forstwirtschaft enthalten. Verlangt werden unter anderem je eine Eingabe für die Bodenart und die Bodenfestigkeit. Diese Informationen können allenfalls durch Fühlproben und den sogenannten «Schraubenziehertest» leicht am Boden ermittelt werden. Indirekt wird mit der Bodenfestigkeit auch der Feuchtigkeitszustand der in der Praxis kaum direkt gemessen werden kann, im Oberboden berücksichtigt. Diese «Praxis-Methoden» werden in der Anwendung anschaulich erörtert. Schon die Eingabemaske zeigt folgende Hauptinformationen auf: Kontaktfläche und -druck sowie den Hinweis auf eine allfällige Schadverdichtungsgefahr. Als Zusatz- und Detailinformationen sind folgende Bodenkennwerte abrufbar: Druckausbreitung im Boden (graphisch und numerisch), Druckzwiesel (graphisch und numerisch) sowie die Druckspannung in einem beliebigen Punkt im Boden (numerisch). Eine allfällige Schadverdichtungsgefahr wird dabei in den entsprechenden Bereichen angezeigt. Unabhängig von diesen Informationen lässt sich die maximale zulässige Radlast gemäss den internationalen Reifennormen berechnen.

TASC – Das Wichtigste in Kürze

Vor Arbeitseinsätzen mit schweren Feldgeräten und -maschinen stellt sich besonders bei erhöhter Bodenfeuchtigkeit die Frage nach der Bodenbeanspruchung. Besteht das Risiko einer Bodenverdichtung, welche technischen Massnahmen bringen welchen Nutzen? Muss der Arbeitseinsatz allenfalls verschoben werden?

TASC (Spezifikationen Kästchen 1) ist ein praxisbezogenes Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung, geeignet für alle Bereiche welche mit dem Problem Fahrwerk-Bodenbeanspruchung konfrontiert sind: Landw. Praxis, Beratung, Planung, Lehre, Reifen- und Landmaschinenindustrie.

Für einen oder mehrere Anwendungsfälle (gleichzeitig maximal vier) können die Bodenbeanspruchung und die Schadverdichtungsgefahr je nach Fahrwerkart, Last, Bereifungs- oder Reifendimension,

Reifeninnendruck, Bodenart und -festigkeit dargestellt werden (Abb. 1). Für eine einfache und schnelle Erfassung der Rei-

Beispiele für die Anwendung:

- Überprüfung der Bodenbeanspruchung je nach Bereifungs-/Raupendimension, Rad-/Raupenlast und Reifen-

Kästchen 1

Software-Spezifikationen – Bestellung	
Version	TASCV1.xls V1.0, 2004
Betriebssystem	Ab Win 98 (2ed)
Software	Ab Office 97, (Excel 97)
Sprachen	Deutsch, Französisch, Englisch
Speicherbedarf	ca. 50 MB
Medium	CD-Rom
Preise (ohne MwSt, ohne Porto): Für öffentl. und gewerbl.	1. Bestellung Update
Anwendung	CH Fr. 350.– (225 €) 150.– (95 €)
Privatanwendung	CH Fr. 120.– (50 €) 50.– (30 €)
E-Mail-Kontakt	etienne.diserens@fat.admin.ch
Herausgeber	Agroscope FAT Tänikon, CH-8356 Ettenhausen www.fat.ch, info@fat.admin.ch
Vertrieb	Agroscope FAT Tänikon, CH-8356 Ettenhausen Tel. 052 368 31 31, Fax: 052 365 11 90 E-Mail: doku@fat.admin.ch

innendruck für eine vorgegebene Oberbodenfestigkeit.

- Überprüfung der Bodengefährdung je nach Oberbodenfestigkeit für eine vorgegebene Belastung (Bereifung, Radlast, Reifeninnendruck).
- Beurteilung der Schadverdichtungsgefahr mit verschiedenen Belastungen je nach Bodentypen, Oberbodenfestigkeit und maximale Auflockerungstiefe.
- Überprüfung der Bodenbeanspruchung in einem beliebigem Punkt des Bodens (z.B. innerhalb einer Pflanzenreihe bzw. ausserhalb des Spurbereichs).
- Vergleich Reifenarten und -typen hinsichtlich der Reifen- und Felgendimensionen, des Lastindex, der Tragfähigkeit je nach Reifeninnendruck, Fahrgeschwindigkeit und der Druckausbreitung im Boden.
- Berechnung der maximal zulässigen Radlast je nach Reifendimension, -innendruck und Fahrgeschwindigkeit.

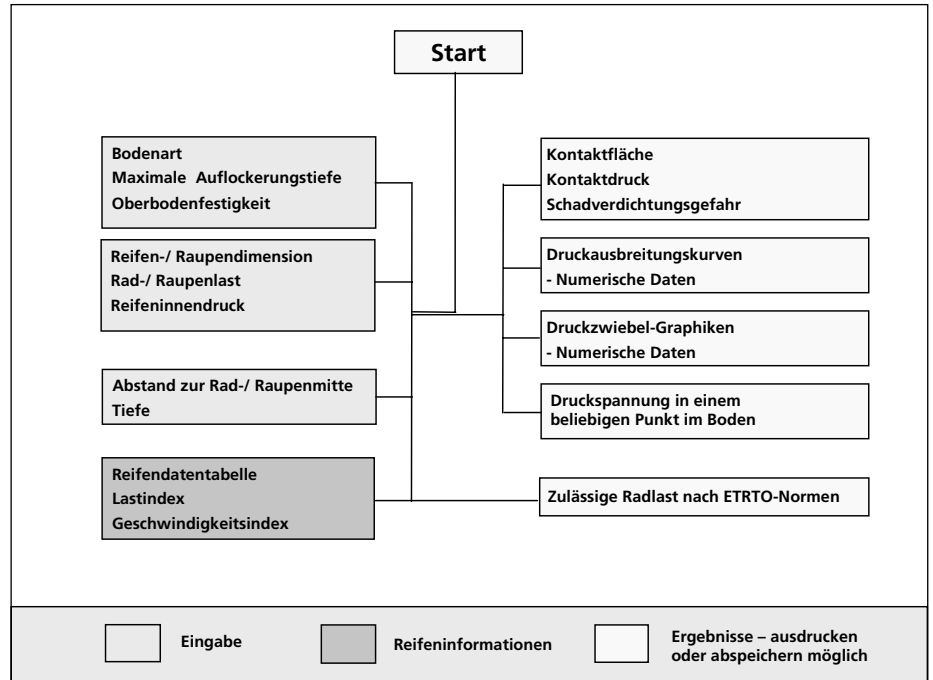


Abb. 1: Vereinfachtes Flussdiagramm von TASC. Da die Eingabepositionen als Standardvorgabe mit typischen Beispieldaten belegt sind, können alle Ausgabemasken auch ohne vorgängige Dateneingabe direkt eingesehen werden.

Grundlagen und Konzept: Vorbelastung und Druckausbreitung

Die Anwendung stützt sich auf das Grundkonzept der sogenannten Vorbelastung. Ist die durch eine Lasteinwirkung hervorgerufene Druckspannung (F) in einer bestimmten Tiefe kleiner als der Bodenwiderstand (R, auch Vorbelastung genannt), entsteht keine Verformung, der Boden reagiert eher elastisch. Wird F jedoch grösser als R, dann reagiert der Boden eher plastisch. Verformungen in Form von Verdichtungen sind zu erwarten (Abb. 2).

Unter Schadverdichtung im Ackerbau versteht man Verdichtungen, die das Pflanzenwachstum nachhaltig beeinträchtigen, sie liegen in einer Bodentiefe unterhalb des Arbeitsbereiches der üblichen Auflockerungswerkzeuge.

(Gleichung 1)

$$LD_{eff.} [g/cm^3] = LD_s [g/cm^3] + 0.009 [T\%]$$

- wobei LD_{eff} für die effektive Lagerungsdichte
 LD_s für die trockene Lagerungsdichte
 T für den Tongehalt (gravimetrisch)

Zur Beurteilung des Verdichtungsgrades als Folge der Einwirkung von Maschinenlast ist die Lagerungsdichte (Masse der Festsubstanz des Bodens pro Volumen-

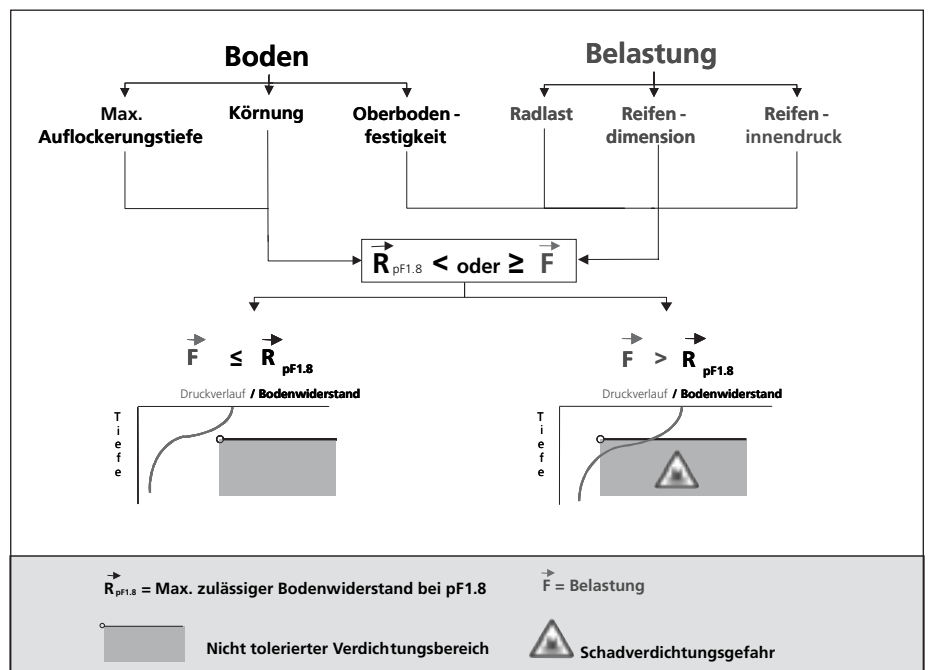


Abb. 2: Grundprinzip der Anwendung. Ist die Druckspannung F in der maximalen Auflockerungstiefe höher als der kritische Bodenwiderstand R in dieser Tiefe, entsteht eine Schadverdichtungsgefahr.

einheit) eine wichtige Bezugsgrösse. Nach Qasem et al. (2000) korreliert die Lagerungsdichte am engsten mit dem Bodenwiderstand (auch Vorbelastung genannt). Zur Berechnung des maximalen zulässigen Bodenwiderstandes werden Regressionen zwischen der effektiven

Lagerungsdichte (Gleichung 1, Arbeitsgruppe Boden 1996) und der Vorbelastung bei pF1,8 (Wasserspannung bei der Feldkapazität, Grobporen $\varnothing > 50 \mu m$ entwässert) aus drei Datensätzen (Lebert 1989, Qasem et al. 2000, FAL 2003) gerechnet (Tab. 1).

Die Arbeitsgruppe «Physikalischer Bodenschutz» der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) erachtet 1,7 g/cm³ als Richtwert für die effektive Lagerungsdichte. Diese Grösse gilt folglich bei TASC als Referenzwert. Zu jedem Datensatz werden die maximalen Stabilitätswerte des Bodens je nach Körnungsklasse wiedergegeben (Tab. 1).

Die hier abgeleiteten Werte der entsprechenden Vorbelastung liegen in einem eher hohen Bereich für die fünf einzelnen Körnungsklassen. Erscheint in der Anwendung die Information «Schadverdichtungsgefahr», so wird daher mit hoher Wahrscheinlichkeit auch eine wirkliche Bodengefährdung vorliegen. Ist nun der Wassergehalt im Unterboden noch höher (Fühlprobe), nimmt die Bodengefährdung gemäss unseren Versuchen wider Erwarten nicht mehr zu. Trocknet der Unterboden hingegen ab, nimmt die Beanspruchung entsprechend ab.

Tab. 1: Bodenstabilitätswerte unter entwässerten Bodenverhältnissen,(*) die zum Richtwert der effektiven Lagerungsdichte (1,7 g/cm³) korrelieren.

Bodenstabilität [kPa] berechnet nach Daten von			TASC	
Lebert (1989)	Qasem (2000)	FAL (2003)	[kPa]	Einstufung gemäss DVWK (**)
Lehmiger Ton, Ton (41-77% T, 22-48% U)				
70	78	– (***)	80	mittel
Toniger, lehmiger, sandiger Schluff, Schluff (9-42% T, 52-86% U)				
108	106	71	105	hoch
Toniger Lehm, Lehm (21-40% T, 29-37% U)				
89	85	71	85	mittel
Sandiger Lehm, lehmreicher Sand (11-20% T 18-39% U)				
105	–	74	105	hoch
Lehmiger Sand, schluffiger Sand, Sand (1-9% T, 3-22% U)				
120	–	–	120	sehr hoch

(*) Grobporen (Ø ≥ 50 µm) entleert. Wasserspannung: 63 hPa
 (**) DVWK für Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (siehe DVWK, 1995)
 (***) Im Tonbereich gab es unter den FAL-Daten keinen Messpunkt mit einer effektiven Lagerungsdichte gleich oder höher als 1,7 g/cm³
 – Keine Messdaten in der Körnungsklasse
 T = Tongehalt
 U = Schuttgehalt

Einzelemente

Die Anwendung besteht aus folgenden Teilen: Eingabe- und Ausgabebereich sowie die Reifendatentabellen mit der zugehörigen Berechnungsoption zur Ermittlung der zulässigen Radlast nach den ETRTO-Normen (The European Tyre and Rim Technical Organisation) (Abb. 1).

Eingabebereich (Abb. 3): Leicht erfassbare Kenngrössen

Bodenart im Bereich der maximalen Auflockerungstiefe: Bei der Festlegung des maximal zulässigen Bodenwiderstandes spielt die Bodenart (Körnung des Bodens) eine Rolle. Die Körnung wird in fünf Klassen eingeteilt. Die Bestimmung der einzelnen Klassen (falls unbekannt) lässt sich anhand von Fühlproben (Hasinger et al. 1993) durchführen (Abb.4).

Mit der **maximalen Auflockerungstiefe** wird festgelegt, ab welcher Tiefe eine Schadverdichtungsgefahr vorkommen kann. Diese entspricht im Ackerbau oft der Höhe der verfestigten Pflugsohle, wenn der Boden periodisch nicht tiefer bearbeitet wird.

Die **Oberbodenfestigkeit** ist entscheidend für die Tragfähigkeit des Bodens. Die Intensität der Druckausbreitung wird dadurch stark beeinflusst. Mittels des Schraubenziehertestes lässt sich die

Abb. 3: Eingabemaske. Bis vier Varianten lassen sich gleichzeitig bearbeiten bzw. vergleichen. Die Reifendaten können entweder aus der Reifentabelle übernommen werden oder aber direkt in Zentimetern eingegeben werden.

Kästchen 2

Anwendungsbeispiele				
Die folgenden Beispiele nehmen Bezug auf die Abbildungen 3 und 7 bis 13				
	1. Fahrwerkvergleich		2. Bodenvergleich	
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Oberbodenfestigkeit	halbfest		halbfest	fest
Maschine	Reifen tractor	Raupentractor	Mähdrescher	
Typ	Case Mx Magnum	Claas Chal. 45	JD MD 2254	
Leistung	169 kW	178 kW	132 kW	
Bereifung / Raupen	20,8R42	64 x 213 cm	800/65 R32	
Gesamtgewicht	7630 kg	10300 kg	19200 kg (Korntank voll)	
Rad-, Raupenlast	2290 kg	5150 kg	7630 kg	
Reifeninnendruck	1,0 bar	–	1,5 bar	
Abbildungen	7	8	9	



Abb. 4: Mittels der Fingerprobe können direkt im Feld Rückschlüsse auf die Körnung bzw. die Bodenart und die Bodenfeuchtigkeit gezogen werden.

1. Fahrwerkvergleich

Bodenbeanspruchung von zwei Fahrwerksystemen: Reifen- und Raupenfahrwerk mit ähnlicher Motorleistung. Voraussetzung: Möglichst gleichmässige Gewichtsverteilung durch optimale Geräteanbringung und ausreichend hohe Raupenspannung. Welches von den beiden Fahrwerksystemen wirkt bodenschonender (Abb. 7-8)?

Aus den **Druckausbreitungskurven** (Abb. 11, Var. 1+2) ist zu entnehmen, dass der Oberboden beim Einsatz des Raupenfahrwerkes trotz der höheren Last weniger beansprucht wird als beim Reifenfahrwerk. Druckspannungen werden unter dem Raupenfahrwerk erst zwischen 45 und 50 cm (45,7 cm) Bodentiefe höher als unter dem Rad. In beiden Fällen gibt es hier bei den vorgegebenen Bodenverhältnissen keine Verdichtungsgefährdung im Bereich der maximalen Auflockerungstiefe bei 25 cm.

Auch die **Druckzwiebelgraphiken** (Abb. 12, Var. 1+2) zeigen die stärkere Beanspruchung des Oberbodens durch den Reifen. Mit zunehmender Tiefe wird zudem verdeutlicht, dass sich die Druckfortpflanzung unter der Raupe infolge der grösseren Kontaktfläche eindeutig langsamer abnimmt.

Aus den **ETRTO-Normen** darf die Bereifung 20.8R42 laut Angaben von Good Year, bei 1 bar und bei 30 km/h mit maximal 3290 kg belastet werden (Abb.15). Wenn der Reifeninnendruck nicht verstellt wird, ist bei 40 km/h eine Radlast von 3075 kg noch zulässig. Betreffend der vorgegebenen Radlast gibt es keine Einschränkungen.

Fazit: In Anbetracht der oben erwähnten Voraussetzung beansprucht die Raupe in diesem Fallbeispiel den Oberboden eindeutig weniger als der Standardreifen. In beiden Fällen besteht in der maximalen Auflockerungstiefe von 25 cm keine Schadverdichtungsgefahr.

2. Bodenvergleich

Bodengefährdung eines Mähdreschers mit 4,8 m Arbeitsbreite und vollem Korntank auf sandigem Lehm. Kann ein mittelgrosser Mähdrescher zur Zeit der Getreideernte einen sandigen Lehmboden schadverdichten (Abb. 9-10)?

Aus den **Druckausbreitungskurven** (Abb. 11, Var. 3+4) besteht eine Schadverdichtungsgefahr in der kritischen Auflockerungstiefe bis über 30 cm Bodentiefe auf halbfestem Oberboden mit vollem Korntank (ca. 4,8 t.). Erst mit einer Lastreduzierung auf ca. 6200 kg wird die Gefährdung beseitigt. Bei festem Oberboden gibt es keine Gefahr. Tendiert man mittels halber Bunkerfüllung auf eine zulässige Radlast von 6,5 t bei einer Reifeninnendrucklimite von 1 bar, so kann die Bodengefährdung in der kritischen Zone wirkungsvoll vermindert werden.

Ist der Boden halbfest (Abb. 12), konzentrieren sich die **Druckspannungen** gegen die Mitte des Reifens. Der Boden wird weniger seitlich, dafür mehr in der Tiefe beansprucht.

Fazit: Auf sandigem Lehm und mit vollem Korntank ist hier nur auf festem Oberboden zu fahren. Beim halbfesten Boden ist nur mit zirka halber Tankfüllung (Radlast 6500 kg, Reifeninnendruck 1 bar) zu arbeiten.

«halbfest» und «weich» definiert. Bei etwas Erfahrung im Umgang mit dieser Methode ist es sehr wohl möglich, auch noch je eine Zwischenbewertung durchzuführen. Im verfestigten, meist feuchten bis sehr feuchten **Unterboden** konnte der Einfluss des **Wassergehaltes** auf die Druckausbreitung in unseren mehrjährigen Feldversuchen dagegen nicht nachgewiesen werden (Diserens et al. 2002).

Reifenart, Reifenbreite und -durchmesser bzw. Raupenbreite und -länge bestimmen weitgehend die Kontaktfläche zwischen Fahrwerk und Boden. Für die Reifen können die Art (Normalquerschnitt, Niederquerschnitt oder Terra) und die Dimensionen direkt aus den Reifendaten-Tabellen in die Eingabetabelle übernommen oder auch manuell eingetragen werden. Bei Raupen werden die Angaben ausschliesslich manuell eingetragen. Die **Rad- bzw. Raupenlast** ist sowohl massgebend zur Ermittlung der Kontaktfläche als auch zur Erfassung des Kontaktdruckes. Um die Grenzbereiche aufzuzeigen, wird dabei die höchste Rad-/Raupenlast einer Arbeitseinheit (Maschine, Fahrzeug) für die Berechnung in Betracht gezogen. Auch der **Reifeninnendruck** steht in engem Zusammenhang mit der Kontaktfläche im Feld. Je tiefer der Reifeninnendruck, desto grösser wird die Kontaktfläche (Diserens 2002). Die Grundlagen von TASC sind bisher vorwiegend auf Farmer- und Traktionsprofil ausgerichtet (Abb. 6).

Ergebnisse: Tabellarisch und grafisch

Der **Kontaktfläche** liegen die Reifenart, Reifendimension, Radlast, und der Reifeninnendruck (die letzteren beiden Kriterien nur bei grossen Bereifungen, Durchmesser > 130 cm) sowie die mathe-

Oberbodenfestigkeit, die vor allem von der Bodenstruktur, **Bodenfeuchte** und vom Wurzelnetz abhängt, auf einfache

Weise in der Praxis einschätzen (Abb. 5, Spiess et al. 2001). Die Bodenfestigkeit wird hier mit den drei Klassen «fest»,



a)



b)



c)

Abb. 5: Schraubenziehertest zur einfachen Bestimmung der Oberbodenfestigkeit: a) fest (> 8 kg Druck), b) halbfest (5-8 kg Druck), c) weich (bis 5 kg Druck). (Foto M. Welter, Landfreund)

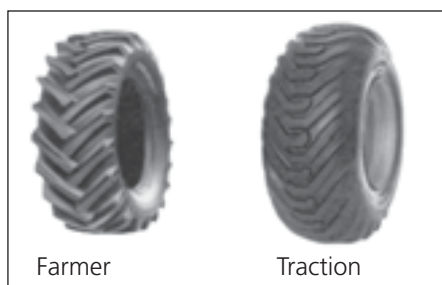


Abb. 6: Den Ausgangsversuchen für TASC liegen vorwiegend Farmer- und Traction-Reifenprofile zugrunde. (Foto Trelleborg)



matischen Zusammenhänge (Algorithmen) für normal gelagerte (abgesetzte), feuchte Ackerböden zu Grunde (Diserens 2002).

Beim **Kontakttdruck** als Ausgangsgrösse für die Berechnung der Druckausbreitung im Boden handelt es sich um den Mittelwert (im Oberboden verläuft die Druckverteilung z.B. infolge der Stolleneinwirkung sehr heterogen). Der mittlere Kontakttdruck wird durch die Rad- oder Raupenlast und die Kontaktfläche bestimmt.

Bodengefährdung: Überschreitet die Druckspannung den festgelegten Bodewiderstand bei $pF1.8$ auf der Höhe der maximalen Auflockerungstiefe, so wird die Schadverdichtungsgefahr mit einem «ja» bestätigt und allenfalls die maximale Tiefe der Schadverdichtungsgefahr angegeben, im anderen Fall verneint.

Abb. 7 + 8: Reifenfahrwerk mit vergleichsweise kleiner Kontaktfläche (Abb.7, Foto Case) und Raupenfahrwerk mit grosser Kontaktfläche (Abb.8, Foto P. Trachsel). Die Motorleistungen dieser Traktoren liegen in der gleichen Grössenordnung, das Gesamtgewicht des Raupentraktors ist beträchtlich höher.

Die Berechnung der **Druckausbreitung und des kritischen Bodenstabilitätspunktes** beruht primär auf den Gleichungen für homogene Böden von Fröhlich (1934). Sie wurden aufgrund zahlreicher Messungen in der Ackerkrume und im Unterboden auf bindige (kohäsive) Böden mit unterschiedlichen

Oberbodenfestigkeiten abgestimmt (Diserens et al. 2002, Abb. 10). Abbildung 11 zeigt Beispiele für den Verlauf der Druckausbreitung: Wenn die Druckausbreitungskurve die Stabilitätsgerade (auf der Höhe der maximalen Auflockerungstiefe) schneidet, entsteht Schadverdich-

tungsgefahr (Variante 3). Nebst der grafischen Darstellung sind die Druckspannungen ebenfalls in Tabellenform zugänglich.

Unter **«Druckzwiesel»** wird eine zweidimensionale Darstellung der Druckausbreitung im Boden (Abb. 12) verstanden,



Abb. 9: Mähdrescher mit 7630 kg Radlast. Als Anwendungsbeispiel stellt sich die Frage, ob mit vollem Korntank allenfalls eine Schadverdichtungsgefahr auftreten kann. (Foto Matra)

Druckspannung ausserhalb der Fahrspur, am Spurrand oder in einer Tiefe über 110 cm, kann je nach Fragestellung sinnvoll sein.

Technische Angaben von mehr als 1000 Reifentypen

In einer Reifendaten-Tabelle finden sich über 1000 Reifentypen (Stand 2003), unterteilt in fünf Hauptgruppen (Antriebs- und Anhängerreifen aus der Forstwirtschaft, Lenkungs-, Antriebs- und Anhängerreifen aus der Landwirtschaft). In jeder Hauptgruppe sind die Bereifungen nach zunehmendem Felgendurchmesser in Zoll aufgelistet. Die Angaben über Reifenart und Reifendimension können eingesehen und direkt in die Eingabetabelle übernommen werden. Unabhängig von den ersten Anwendungsteilen lässt sich von jeder Reifenposition die maximal zulässige Radlast je nach Bereifung, Reifeninnendruck und Fahrgeschwindigkeit nach den ETRTO-Normen berechnen.

Neben den Standardgrössen wie Felgendurchmesser, Felgentypen, Reifenbreite, Reifendurchmesser, Kontaktfläche, Last und Geschwindigkeitsindex (Abb. 14a) sind auch Angaben über die minimale und maximale Tragfähigkeit bei 30 km/h sowie über die maximal zulässige Tragfähigkeit bei 40 km/h enthalten (Abb. 14b).

Reifentragfähigkeit ist auch sicherheitsrelevant

Die maximal zulässige Radlast kann je nach Reifenkategorie, Reifeninnendruck und Fahrgeschwindigkeit variieren. Um nun die maximal zulässige Radlast für einen bestimmten Fall zu berechnen, wird aus der Reifentabelle die maximale Last bei 30 km/h (Reifeninnendruck beachten) unter der entsprechenden Reifenkategorie in die Berechnungstabelle (Abb. 15) übertragen und die gewünschte Geschwindigkeit eingetragen.

basierend auf der Grundformel von Bousinesq (Lang et al. 1982). Die Einzellinien bzw. die sogenannten «Isobarelinien» geben jeweils einen konstanten Druckverlauf wieder. Auch hier erfolgte ebenfalls eine Anpassung für mittelschwere bis schwere bindige Ackerböden mit unterschiedlichen Oberbodenfestigkeiten. Abbildung 12 zeigt, dass die Druckspannung bei höherer Last (Variante 2) tiefer in den Boden eindringt als bei kleinerer Last (Variante 1). Bei konstanter Last und unterschiedlichen Bodenverhältnissen dagegen konzentrieren sich die Druckspannungen gegen die Mitte bei eher abnehmender Bodenfestigkeit (Variante 3 halbfester Oberboden, Variante 4 fester Boden). Mit zunehmender Tiefe

wird der Druckspannungsunterschied bei identischer Radlast immer kleiner. In einer zusätzlichen Tabelle sind die Einzelwerte der Isobarelinien schrittweise wiedergegeben.

Abbildung 13 zeigt, dass sich auch die **Druckspannung** in einem beliebig vorgegebenen Punkt des Bodens berechnen lässt. So wird zum Beispiel bei der Variante 3 die Schadverdichtungsgefährdung in 25 cm Bodentiefe, bei 17,4 cm Abstand zur Radmitte erreicht. Es wird also eine maximale Breite von 34,8 cm (2-mal 17,4 cm) in 25 cm Tiefe schadverdichtet. Wird der Abstand zur Fahrwerkmitte auf null gesetzt, dann erhält man die Werte der Druckausbreitungskurve (Abb. 11, Variante 3). Die Erfassung der

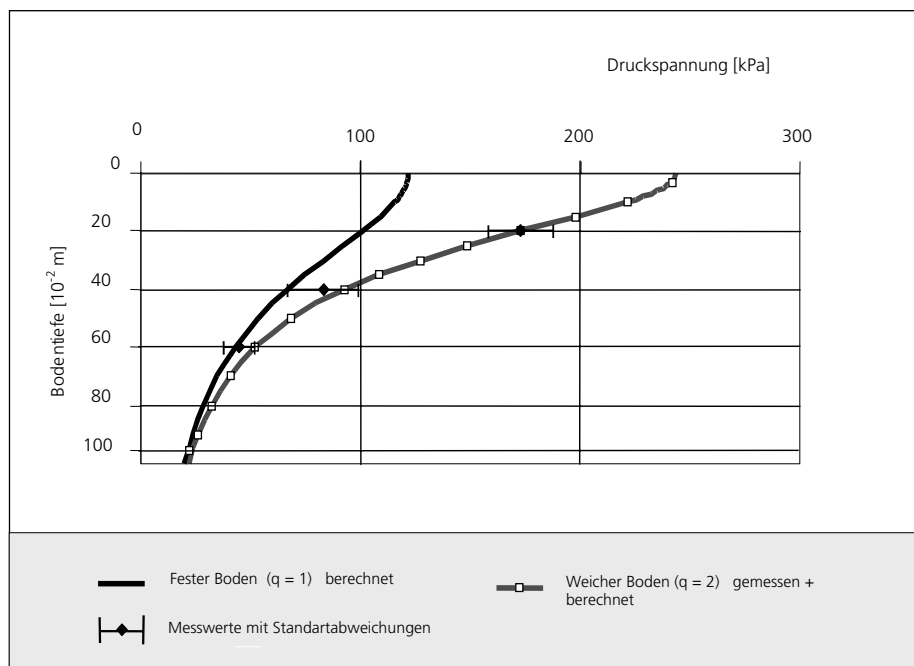
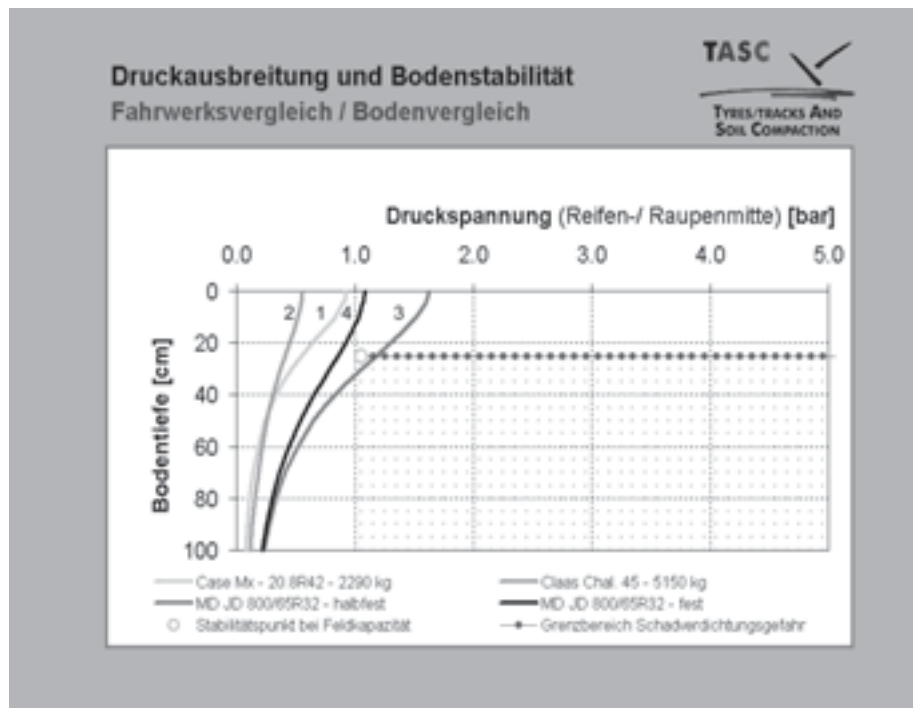


Abb. 10: Modellrechnung: Beispiel für die Ableitung der Gleichung für die Druckausbreitung. Weicher Boden: Mähdrescher, Bereifung 800/65R32, Radlast 7630 kg, Reifeninnendruck 1,5 bar.



- (1) Tolerierbare Verdichtung
- (2) Tolerierbare Verdichtung
- (3) **Schädverdichtungsgefahr zwischen 25 und 30 cm**
- (4) Erhöhte Verdichtungsgefahr bis 7 cm

Abb. 11: Druckausbreitung im Boden. Wird der Grenzbereich durch die Druckausbreitungskurve geschnitten, ist die Belastung als zu hoch zu werten, es besteht Schädverdichtungsgefahr.

Auswahl unterschiedlicher Böden, Festigkeitsverhältnisse und Bereifungen können die Informationen von TASC immer nur eine mehr oder weniger grosse Annäherung an die realen Verhältnisse erreichen. Im Hinblick auf die vielfältige Beschaffenheit der Böden und die möglicherweise grosse räumliche und zeitliche Variabilität innerhalb einer Ackerfläche wird dies verständlich. Dazu kommen noch die in gewissen Situationen nicht hinreichend erfassbaren dynamischen Komponenten aus dem Boden und aus dem Fahrwerk bei der Kraft- bzw. Lastübertragung durch die Fahrwerke. Je nach der jeweiligen Ausgangslage verlangen die Ergebnisse daher eine entsprechend vorsichtige bzw. differenzierte Interpretation (Kästchen 3).

Mittelschwere bis schwere Ackerböden

Die Ausgangsversuche fanden bisher ausschliesslich auf **Ackerflächen** mit eher **bindigen (kohäsiven) Bodentextur** (sandigem Lehm bis lehmiger Ton mit über 15% Tongehalt und weniger als 5% Humusgehalt) statt. Ausgesprochene

Sandböden sind infolge der groben Körnung wenig bindig. Wegen des hohen Humus- oder Torfgehaltes gilt dies auch für die organischen Böden (Moorgley-, Anmoorgley- und Moorböden). Demzufolge ist zu erwarten, dass die Druckausbreitung in diesen Böden für eine bestimmte Belastung intensiver als in bindigen Böden abläuft. Infolge einer noch nicht ausreichenden Versuchsgrundlage mit diesen Bodentypen sind die Ergebnisse bei der Erfassung von sandreichen und organischen Böden mit Vorbehalt zu interpretieren. Die Schädverdichtungsgefahr im Unterboden ist hier eher grösser. Eine Validierung auf Naturwiese oder Waldböden fehlt ausserdem noch weitgehend. Zu erwähnen ist, dass die Waldoberböden empfindlicher als die Ackeroberböden sind. Schädverdichtungen kommen schon bei kleineren Belastungen vor.

Bei den Felderhebungen waren **feuchte bis nasse (gesättigte) Bodenverhältnisse** die Regel. Wenige feuchte bis eher trockene Unterbodenverhältnisse mit einer höheren Wasserspannung als 130 hPa (Poren $\varnothing > 23 \mu\text{m}$ entleert) wurden nur in zwei Einzelfällen festgestellt. Hier

liegt der Hauptgrund, dass der kritische Bodenstabilitätspunkt bei einer Wasserspannung von 63 hPa (gilt als Referenzwert für feuchte Böden) festgelegt wurde. Kann der Unterboden nach der Überprüfung als trocken bezeichnet werden ($>150 \text{ hPa}$), ist die Schädverdichtungsgefahr beträchtlich kleiner. Die Ausgangsversuche fanden auf Standorten mit einem geringeren **Skelettanteil ($< 3\%$)** statt. Es ist anzunehmen, dass der Boden mit zunehmendem Skelettanteil tragfähiger und dementsprechend auch weniger verdichtungsempfindlich wird. Dieser Einfluss (Skelettanteil $> 3\%$) wird in der Anwendung noch nicht berücksichtigt.

Kleine Reifen: Reifeninnendruck wird bisher nicht berücksichtigt

Bisher werden nur bei **Bereifungen mit einem Durchmesser $> 130 \text{ cm}$** die Radlast und der Reifeninnendruck für die Bestimmung der **Kontaktfläche** und dementsprechend auch für die Beurteilung der Bodengefährdung berücksichtigt (Diserens 2002). Für **kleinere Bereifungen** (Lenkungsreifen, Kleintraktoreifen und die meisten Anhängerreifen mit einem Reifendurchmesser $\leq 130 \text{ cm}$) wird hingegen der Reifeninnendruck bei der Ermittlung der Kontaktfläche bzw. der Beurteilung der Bodengefährdung nicht miteinbezogen. Bei den Erhebungen der Kontaktfläche im Feld sind vorwiegend Bereifungen mit **Traktion oder Farmer-Profil** für Zugmaschinen geprüft worden. Berechnungen für Anhängerreifen mit **Ribbed-, A.W. oder Flotation Profile** sind demzufolge mit Vorbehalt zu interpretieren.

Maximal drei Überrollungen, Fahrgeschwindigkeit 3 bis 8 km/h

Bei der Berechnung der Bodengefährdung wird allgemein **von einer Felddurchfahrt** (d.h. von bis zu drei Reifenüberfahrten mit drei Achsen) ausgegangen. Dabei ist von Bedeutung, dass vor allem bei schweren selbstfahrenden Erntemaschinen die maximale Belastung zwei- bis höchstens dreimal auf der gleichen Stelle einwirkt. **Wendevorgänge** am Parzellenrand mit **Vielfachbefahrungen** können mit der Anwendung nicht berücksichtigt werden. Bei den Feldversuchen lag die **Fahrgeschwindigkeit** zwischen 3 und 8 km/h. Der Boden wurde somit durch **dynami-**

sche Kräfte beansprucht. In diesem Geschwindigkeitsbereich kann der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Bodenverformung infolge der Sofortsetzung vernachlässigt werden. Grundsätzlich aber weicht die zeitunabhängige Sofortsetzung von der maximalen Setzung (erreicht im Labor nach 24 Stunden unter statischer Krafteinwirkung) bei grobkörnigen Böden weniger ab als bei feinkörnigen feuchten Böden (Horn et al. 1994). Unter einer kurzen Belastung und bei unkonsolidierten Böden verformt sich ein Sandboden stärker und schneller als ein Tonboden. Es ist anzunehmen, dass die Fahrgeschwindigkeit (wenn überhaupt) deswegen eine kleinere Rolle für grobkörnige als für stark kohäsive Böden spielt.

Rad- und Raupenlasten können in der Praxis variieren

Es ist zu beachten, dass die Rad- oder Raupenlasten im praktischen Einsatz infolge der **Zug- und Drehmomente** oder **Schwerpunktverlagerungen am Fahrzeug** von den in statischem Zustand (ohne Zusatzgeräte, ohne Zusatzbelastung) ermittelten Werten stark abweichen können. In Erzielung realistischer Ergebnisse sind hier allenfalls entsprechende Anpassungen bei den Eingabewerten vorzunehmen. Dies betrifft beispielsweise Traktoren bei hoher **Zugbelastung** (Radlast vorne nimmt ab und hinten zu), schweren **Anbau-/Aufsattelgeräten und hohen Deichselstützlasten** (Radlast hinten erhöht sich). Beträchtliche Veränderungen der Rad-/Raupenlasten können auch durch die unterschiedlichen **Bunker-/Tankfüllungen** bei Erntemaschinen auftreten. **Hanglagen** bewirken bei allen Fahrzeugen entsprechende Verlagerungen der Rad-/Raupenlasten (seitlich bei Schichtlinienfahrt und in der Längsachse bei Berg- und Talfahrt).

Raupen erfordern besondere Umsicht

Bei **Raupenfahrwerken** können die **partiellen Kontaktdrücke** infolge der einzelnen Stützrollen und ungünstiger Zugmomente je nach den technischen Einflussgrößen (Raupenspannung, Stützrollenabstand und -aufhängung, Geräteanbringung bei Zugmaschinen) und den Bodenverhältnissen vom berechneten Mittelwert mehr oder weniger abweichen (Keller 2002). Fehler bei der Geräteanbringung (z.B. zu hohe Belas-

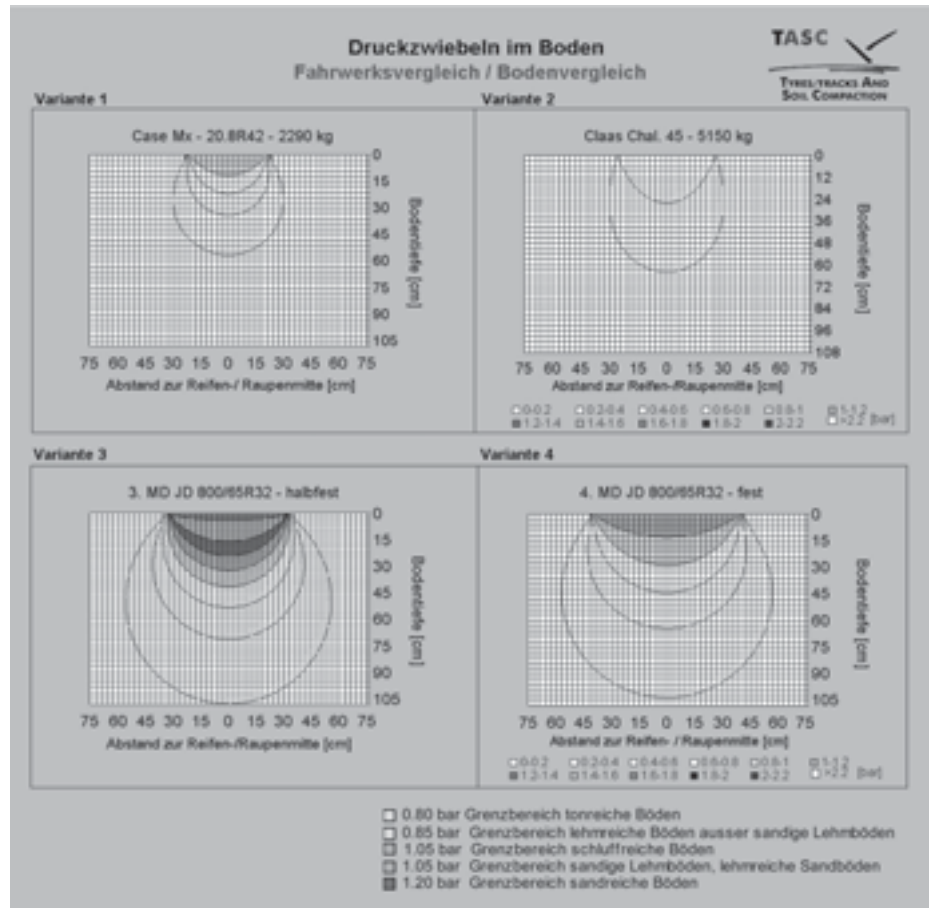


Abb. 12: Druckzwiebel-Graphiken ermöglichen eine zweidimensionale Beurteilung der Bodengefährdung. Dabei wird deutlich, dass die Druckeinwirkung in der Reifen- bzw. Raupenmitte am höchsten ist.

Druckspannung in einem vordefinierten Punkt im Boden
Fahrwerksvergleich / Bodenvergleich

Bezeichnung	Abstand zur Reifen-/ Raupenmitte [cm]	Tiefe [cm]	Druckspannung (rot = Schädverdichtungsgefahr) [bar]
Variante 1 Case Mx - 20.8R42 - 2290 kg	0	20	0.6373
Variante 2 Claas Chal. 45 - 5150 kg	0	20	0.4476
Variante 3 MD JD 800/65R32 - halbfest	0	25	1.1771
Variante 4 MD JD 800/65R32 - fest	0	20	0.9199

Abb. 13: Druckspannung in einem vordefinierten Punkt im Boden. Eine Druckspannungsberechnung ausserhalb der Fahrspur (zB. in Pflanzenreihen), am Spurrand oder in grosser Tiefe (> 110 cm) kann bei bestimmten Fragestellungen sinnvoll sein.

tung der hinteren Umlenkrolle) können sich dabei noch gravierender auswirken (punktuell hohe Lasten) als bei Reifen-traktoren. Wie bei Bereifungen wird hier als Ausgangsgrösse der mittlere Kontaktdruck anhand der Kontaktfläche und Raupenlast berechnet. Realistische Informationen kann TASC nur hervorbringen,

wenn eine möglichst gleichmässige Lastverteilung auf die Stütz- und Umlenkrollen erzielt werden kann, wie es die Ergebnisse von Marsili et al. (1998) bei bindigen Böden zeigen. Bei lockerem, ebenem Boden wird das Optimum dann erreicht, wenn die Einsinktiefen der Raupen während dem Arbeitseinsatz vorne

REIFENTABELLE	LANDWIRTSCHAFT / Antriebsreifen						Reifenbreite ⁽⁴⁾ cm	Aussendurchmesser ohne Last ⁽¹⁾ cm	Kontaktfäche ⁽²⁾ cm ²	Ply rating PR
	Felgen- durchm. Zoll	Reifen- kategorie ⁽¹⁾	Reifen- aufbau ⁽²⁾	Reifenart ⁽¹⁾	optimale Felgen- dimension Breite x Durchm. Zoll	Felgendimension mögliche Breite Zoll				
9.5-42	42	AR	d	no	W7x42	WB	24	153	1240	1F
11.2 R42	42	AR/PR	r	no	W10x42	WB, W9	28	158	1510	
12.4-42	42	AR/PR	d	no	W11x42	-	31	160	1696	6
18.9 R 42	42	AR	r	no	W15x42	14 W/WL DW, W15L, DW15	43	178	2584	1
18.4-42	42	AR	d	no	W18Lx42	W15L	47	196	2913	8
18.4 R 42	42	AR	r	no	W18Lx42	15 W/WL DW, W18L, DW18	47	185	2902	
20.8-42	42	AR	d	no	W18Lx42	W18L	53	194	3444	1
20.8 R 42	42	AR	r	no	W18Lx42	W18L	53	194	3430	
300/95R42	42	AR/PR	r	no	W10x42	W9, W11	30	182	1630	
580/70 R 42	42	AR	r	ni	W18Lx42		58	191	4891	
620/70 R 42	42	AR	r	ni	W20x42	18 W/WL DW, W20L, DW20	62	195	5338	
850/65 R 42	42	AR	r	ni	DW20x42	W18L	65	191	5493	
850/55-42	42	AR	d	tr	DW28x42		85	196	7397	
750/60-42	42	AR	d	f	DW24x42		75	196	6527	
8.3 R 44	44	AR	r	no	W7x44		21	171	1091	

a)

REIFENTABELLE	Last bei 30 km/h						Min. Max. Reifeninnendruck bei entspr. Geschwindigkeit und Last						Lastindex LI
	0.8 bar kg	1.8 bar kg	1.5 bar kg	2.0 bar kg	2.5 bar kg	3.0 bar kg	min. Reifendruck bei 30 km/h bar	min. Last bei 30 km/h kg	max. Reifendruck bei 30 km/h bar	max. Last ⁽¹⁾ bei 30 km/h kg	max. Reifendruck bei 40 km/h bar	max. Last ⁽¹⁾ bei 40 km/h kg	
9.5-42	675	775	990	1185	1330	1470	0.8	675	3.5	1630	3.5	1305	125
11.2 R42	995	1145	1485	1785	2055	2310	0.8	995	3.6	2600	3.6	2430	139
12.4-42	1015	1155	1480	1735	1965		0.8	1015	2.8	2105	2.8	1885	134
18.9 R 42			2480				1.2	2150	1.7	2670	1.7	2135	14
18.4-42		2050	3015				1	2250	1.8	3050	1.8	2680	15
18.4 R 42	2450	2680	3280				0.5 (F*) 0.6	1890 (F*) 2210	1.8	3400	1.8	3150	14
20.8-42		2480	3750				1	2490	1.5	3750	1.5	3000	154
20.8 R 42	2995	3290	4025	4680			0.5 (F*) 0.6	2380 (F*) 2875	2.4	6215	2.4	4875	163
300/95R42		1260	1690	2020	2340	2695	1	1290	3.8	2915	3.8	2725	143
580/70 R 42	3300	3620	4400				0.8	2990	1.6	4580	1.6	4280	158
620/70 R 42	3500	3940	4700				0.8	3180	1.6	4880	1.6	4500	160
850/65 R 42	3210	3585	4415	4950	5590	6205	0.4 (M) 0.6	2100 (M) 2835	3.2	6420	3.2	6000	170
850/55-42	4530									4530	0.8	4235	140
750/60-42										4930			

b)

Abb. 14: Reifendaten-Tabelle. Ausschnitte aus Antriebsreifen für Landwirtschaft. a) Standardangaben, b) zulässige Radlasten und Reifeninnendrucke.

Last in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Reifeninnendruck nach Firmen- und ETRTO-Angaben (European Tyre and Rim Technical Organisation)					TASC
Reifenkategorie	Geschwindigkeits- index	Reifen- bezeichnung Reifeninnendruck	max. Last bei 30 km/h Zoll	geforderte Geschwindigkeit km/h	max. Reifendruck bei angemessener Geschw. und Reifeninnendruck Zoll
Leitungs-, Antriebsreifen	A2	425/75R20 / 2 bar	2795	bis: 10/15/20/25/30/35/40	2575
Leitungs-, Antriebsreifen	A6	18.4-30 / 1 bar	2005	10	2007
Leitungs-, Antriebsreifen	A8	20.8R42 / 1 bar	3290	40	3075
Anhängereifen	A8	700x5.22.5 / 1.5 bar	4790	10	6179
Anhängereifen	A8	12.5.15 / 3 bar	1525	40	1362
Mehrzweckreifen MPT	G	445/70R24 / 3.5 bar	4310	60	3793

Abb. 15: Beispiele für die Berechnung der Tragfähigkeit je nach Reifeninnendruck und Fahrgeschwindigkeit (nach ETRTO Normen). So weist der Antriebsreifen 20.8R42 (3. Linie), bei 1 bar und 30 km/h eine maximale zulässige Belastung von 3290 kg auf (Abb. 14b). Bei 40 km/h liegt diese Last nur noch bei 3075 kg. Folglich kann mit ausreichender Sicherheit mit 40 km/h gefahren werden. Bei einer zusätzlichen Belastung von beispielsweise 1,8 t auf der Hinterachse (angebauter 6-Schar Wendepflug), wären 40 km/h hingegen nicht mehr zulässig.

und hinten konstant ist, und die Raupen möglichst gerade (nicht wellig) auf dem Boden aufliegen.

Druckspannungsberechnung ist eine Annäherung

Erst ab einer Tiefe von zirka 15 cm ist die **Druckspannungsberechnung** im herkömmlichen Ackerbau wirklich relevant. Einerseits entstehen beim Befahren oft Fahrspuren, die in der Anwendung nicht wiedergegeben werden und andererseits ist die Druckverteilung an der Bodenoberfläche wegen des stark ausgeprägten Reifen-/Raupenprofils sehr heterogen. Für eine möglichst reproduzierbare Erfassung der maximalen Druckspannung in der Rad- oder Raupenachse wurde davon ausgegangen, dass sich die Druckspannungen mit zunehmendem Weichen des Bodens in Richtung Radmitte konzentrieren. Darin liegt auch der Grund, weshalb in den Druckzweibeldiagrammen bei halbfestem und weichem Boden keine Isobarelinien an den beiden

Kästchen 3

Anwendungsbereich
<p>TASC ist vor allem auf praxisbezogene Empfehlungen und Richtlinien für den Maschineneinsatz ausgerichtet. Im Vordergrund steht die Verhinderung von Schadverdichtungen im Unterboden. Im Einzelfall kann der Zustand des Bodens lokal nicht wiedergegeben werden. Die Anwendung berücksichtigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kohäsive eher bindige Ackerböden mit einem geprägten Bearbeitungshorizont (Pfügen, Grubbern) zwischen 20-25 cm. • Feuchte bis nasse Unterbodenverhältnissen mit einem geringeren Steinanteil. • Eine Felddurchfahrt mit bis zu drei Reifenüberfahrten (drei Achsen). • Fahrgeschwindigkeiten zwischen 3 und 8 km/h. • Bereifungen mit geprägten Stollen (Farmer, Traktionsprofil). Der Reifeninnendruck zur Erfassung der Druckausbreitung wird nur für Reifendurchmesser über 130 cm berücksichtigt. • Der Druckspannungsverlauf wird ab einer Tiefe von ca. 15 cm realistisch wiedergegeben (bei geringeren Tiefen in der Praxis heterogen).
Einschränkungen
<p>Für die folgenden Situationen/Aspekte wurde TASC bisher noch nicht oder nur unzureichend ausgerichtet bzw. evaluiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nicht kohäsive Böden wie Sandböden oder organische Böden sowie Naturwiese und Waldböden. • Trockene bindige Unterböden. Die Schadverdichtungsgefahr nimmt hier stark ab. • Böden mit hohem Steinanteil. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Tragfähigkeit höher ist. • Vorgewendeflächen: Durch die Vielfachbefahrungen mit hohen Lasten wird der Boden beim Wenden übermässig stark beansprucht, Schadverdichtungen können die Folge sein. • Radlastveränderungen am Fahrzeug während dem praktischen Einsatz (Zug- und Drehmomente oder Schwerpunktverlagerungen) müssen bei der Dateneingabe abgeschätzt bzw. berücksichtigt werden. • Bereifungen mit flachen Stollen für Transport (Implementreifen, Ackerwagen, Flotation Profile, Durchmesser kleiner 130 cm). Der Reifeninnendruck zur Erfassung der Druckausbreitung wird bisher nicht berücksichtigt. • Bestehende Schadverdichtungen können mit TASC nicht erkannt werden.

Reduzierung der Belastung ist damit angezeigt. Eine Aussage über Strukturveränderungen im Boden als Folge einer bestimmten Belastung lässt sich jedoch nicht formulieren. Hierfür wären Bodenuntersuchungen mindestens vor dem Befahren und zwar an mehreren Stellen erforderlich, da der Boden als stark heterogenes Gebilde von Punkt zum Punkt sehr unterschiedlich beschaffen sein kann.

Bei der **Nachkontrolle** (nach dem Befahren) ist generell darauf zu achten, dass eine **maximale Spurtiefe von 6-7 cm** nicht überschritten wird.

Nachprüfung der Anwendung aufgrund von Versuchen

Der Boden gilt als schadverdichtet, wenn die effektive Lagerungsdichte den Richtwert von 1,7 g/cm³ überschreitet bzw. wenn die Druckspannung bei der maximalen Auflockerungstiefe den Stabilitätspunkt überschritten hat.

Drei Fälle werden unterschieden:

– **Keine Gefährdung:** Keine Gefahr liegt vor, wenn die berechnete Druckspannung in der entsprechenden Tiefe der Bodenbeprobungen (abhängig von der Bodenart) gleich oder kleiner als der Stabilitätspunkt ist. Eine Über-

Rändern des Rades oder der Raupen entstehen, obwohl bestimmte, nicht vernachlässigte Spannungen hier noch einwirken können. Auch wenn das Druckzwibelmodell von Boussinesq aufgrund von Feldmesswerten aus heterogenen Ackerböden angepasst wurde, bleibt diese zweidimensionale Darstellung auch eine Annäherung an die wirkliche Situation, vor allem in den obersten 15 cm.

Bei Schadverdichtungsgefahr ist Handlungsbedarf angezeigt

Ein Hinweis auf **Schadverdichtungsgefahr** ist gleichzusetzen mit einem massigen bis hohen Risiko, dass sich der Boden in der kritischen maximalen Auflockerungstiefe im Sinne einer langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zu stark verdichtet. Ein Handlungsbedarf zum Beispiel in Form einer

Tab. 2: Validierung der Anwendung mit Feldmessungen unter feuchten bis nassen Unterbodenverhältnissen* - Der Boden kann bis in 13 Fällen als vorverdichtet bezeichnet werden (Fall C).

Effektive Lagerungsdichte Richtwerte in g/cm ³	Oberboden		Unterboden			Boden gesamt	
	10-15 cm		35-40 cm	55-60 cm	gesamt		
	1,7	1,6**		1,7		1,7	1,6**
Fall A: Boden nicht schadverdichtet vor und nach oder nur nach dem Befahren							
Anzahl Situationen	15	6	22	20	42	57	48
Übereinstimmung in %	7	17	73	100	86	65	77
Fall B: Boden schadverdichtet nach dem Befahren							
Anzahl Situationen	9	11	0	0	0	9	11
Übereinstimmung in %	100	100	–	–	–	100	100
Fall C: Boden vorverdichtet (für die Validierung ungültig)							
Anzahl Situationen	0	7	4	2	6	6	13
Übereinstimmung in %	–	100	100	100	100	100	100
Gesamt gültig							
Anzahl Situationen	24	17	22	20	42	66	59
Übereinstimmung in %	42	71	73	100	86	70	81
* In 90% der Situationen, Wasserspannung < 63 hPa, Grobporen (Ø ≥ 50 µm) zum Teil entleert							
** Richtwert Oberboden 1,6 g/cm ³ (nach 0,1 g/cm ³ Abzug gemäss Petelkau, 1991)							

einstimmung zwischen der TASC-Information und der Feldmessung trifft dann zu, wenn die effektive Lagerungsdichte nach dem Befahren nicht über dem Richtwert ($1,7 \text{ g/cm}^3$) lag, sofern vor und nach oder nur nach dem Befahren der Boden nicht schon vorverdichtet ist (Fall A, Tab. 2).

- **Gefährdung:** Schadverdichtungsgefahr liegt vor, wenn die berechnete Druckspannung in der entsprechenden Tiefe der Bodenbeprobungen den Stabilitätspunkt überschritten hat. Eine Übereinstimmung zwischen der TASC-Information und der Feldmessung gibt es dann, wenn die effektive Lagerungsdichte erst nach dem Befahren über dem Richtwert ($1,7 \text{ g/cm}^3$) liegt (Fall B, Tab. 2).
- **Boden schon gefährdet:** Liegt die effektive Lagerungsdichte schon vor dem Befahren über dem Richtwert, sind keine Aussagen über die Übereinstimmung der Anwendung mehr möglich (Fall C, Tab. 2). Der Boden ist konsolidiert. Sowohl bei tiefer als auch hoher Belastung wird sich die Struktur kurzfristig nicht mehr verändern können.

Die Anwendung konnte in insgesamt 66 von 72 Situationen (bei sechs Situationen war der Boden vorkonsolidiert) an zwölf feuchten bis nassen Standorten anhand von unabhängigen Bodenuntersuchungen geprüft werden. Dabei wurde die Zutrefflichkeit der TASC-Ergebnisse überprüft (Tab. 2).

Die Übereinstimmung zwischen der TASC-Aussage und den Messwerten liegt im Oberboden bei 42%, im Unterboden (Schadverdichtungsgefährdung am höchsten) bei 73% zwischen 35 und 40 cm, bei 55 bis 60 cm Bodentiefe erreicht die Übereinstimmung sogar 100%. Würde der Richtwert der effektiven Lagerungsdichte gemäss Petelkau (1991) für den Oberboden um $0,1 \text{ g/cm}^3$ tiefer als für den Unterboden liegen (Richtwert für den Oberboden $1,6$ anstatt $1,7 \text{ g/cm}^3$), so läge die Übereinstimmung auch im Oberboden über 70%. Der Unterboden war zum Teil vorverdichtet, Strukturveränderungen mit Werten über $1,65 \text{ g/cm}^3$ zwischen 30 und 40 cm kamen vor. In 90% der Situationen lag die Wasserspannung im Unterboden deutlich tiefer als 63 hPa ($pF_{1,8}$) in einem sehr feuchten bis nassen Bereich. Aufgrund der kritischen Bodenfeuchteverhältnisse zur Zeit der Feldmessungen liegt das Ergebnis von TASC auf der sicheren Seite.

Schlussfolgerungen

Die grundlegende Frage, ob eine Beurteilung der zulässigen Bodengefährdung durch Maschinenlast im praktischen Einzelfall möglich ist, war bisher weitgehend offen. Die nun vorliegende Anwendung – basierend auf mehrjährigen Feldversuchen und Datenauswertungen aus dem In- und Ausland – zeigt, dass nützliche Ansätze hierfür vorerst für kohäsive Böden im Ackerbau vorliegen. Dabei spielt der seit kurzem von der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) verabschiedete Richtwert betreffend der effektiven Lagerungsdichte eine zentrale Rolle. Die Überprüfung der Aussage für den Unterboden ergab eine Zutrefflichkeit über 85%. Auch lassen sich die wichtigsten Zusammenhänge zwischen Fahrwerk und Boden für eine bestimmte Situation praktisch aufzeigen. Im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip beim Bodenschutz kann TASC in der Praxis einen beträchtlichen Beitrag leisten.

Während der vergangenen Jahre hat auch die Mechanisierung im Futterbau überaus starke Entwicklungsschübe hinsichtlich Leistungssteigerung erfahren. Nicht selten stehen nun auch hier Traktoren bis 150 kW , Erntemaschinen und Fahrzeuge für die Hofdüngerausbringung mit Radlasten von 5 bis 6 t im Einsatz. Die Zeiten der «leichten Futterbaumaschinen» sind in neu ausgerichteten Betrieben vorbei. Da der Boden bei Wiesen in der Regel nicht aufgelockert wird, kommt hier der Bodenbeanspruchung eine besondere Bedeutung zu. Die Weiterentwicklung von TASC wird daher nebst der Fokussierung auf die nicht bindigen Böden im Ackerbau und Implementreifen folglich auch auf Wiesen ausgedehnt.

Kästchen 4

Fachbegriffe
<p>Boden</p> <p>Sand (S, s=sandig): Grobe Bodenfraktion (\emptyset zwischen 50 und $2 \times 10^3 \mu\text{m}$). Knirscht zwischen den Zähnen, Sandkörner sichtbar.</p> <p>Schluff (U, u=schluffig): Feine Bodenfraktion (\emptyset zwischen 2 und $50 \mu\text{m}$), wirkt seifig im feuchten Zustand und mehlig im trockenen Zustand.</p> <p>Ton (T, t=tonig): Feinste Bodenfraktion ($\emptyset < 2 \mu\text{m}$), wirkt klebrig im feuchten Zustand.</p> <p>Lehm (L, l=lehmig): Boden mit 20 bis 30% Ton- und weniger als 50% Schluffanteil.</p> <p>Leichter Boden (S, IS): Sandkörner sicht- und fühlbar, nicht oder schwach bindig, kaum formbar, rissig, brüchig.</p> <p>Mittelschwerer Boden (L, IU, sL, U): Wenig Sandkörner sicht- und fühlbar, knirscht zwischen den Zähnen, formbar, rissig, ausrollbar, bleistift dick (\emptyset 2-7mm).</p> <p>Schwerer Boden (T, IT, tL, tU): Kaum Sandkörner sicht- und fühlbar, knirscht kaum zwischen den Zähnen, gut formbar, glänzende Reibfläche, nageldick rollbar ($\emptyset < 2\text{mm}$).</p> <p>Bodenkörnung: Einteilung des Bodens nach den Korngrößen (siehe Korngrösse für Ton, Schluff, Sand).</p> <p>Bodentextur: Einteilung des Bodens nach den Kornfraktionen (Ton, Schluff, Sand).</p> <p>Skelett: Grobe Bodenfraktion (\emptyset ab 2 mm).</p> <p>Feldkapazität: Bodenfeuchtezustand ohne Gravitationswasser. Je höher das Wassergehalt bei der Feldkapazität liegt, desto mehr Wasser für die Pflanzen zur Verfügung stehen ohne Mangel an Sauerstoff.</p> <p>Lagerungsdichte $[\text{g}/\text{cm}^3]$ (auch trockene Lagerungsdichte): Masse der Festsubstanz des Bodens pro Volumeneinheit.</p> <p>Effektive Lagerungsdichte $[\text{g}/\text{cm}^3]$: Korrigiertes Mass für die Lagerungsdichte nach Berücksichtigung des Tongehalts.</p> <p>Wasserspannung $[\text{hPa}]$: Sämtliche Kräfte pro Flächeneinheit, die das Wasser im Boden gegen die Schwerkraft wirken (Adsorptions-, Kapillarkräfte). $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 100 \text{ N}/\text{m}^2 = 10^{-3} \text{ bar}$</p> <p>pF Wert: Negativer Logarithmus der Wasserspannung. Mass für den Trocknungsgrad des Bodens (zum Beispiel: $pF_{1,8} = 63 \text{ hPa}$, Boden feucht, Grobporen $\emptyset > 50 \mu\text{m}$ entwässert; $pF_{2,5} = 316 \text{ hPa}$, Boden trocken, Mittel- und Grobporen $\emptyset > 10 \mu\text{m}$ entwässert).</p> <p>Moor: Hydromorphe Böden (mit Wasser geprägt) mit einem über 30 cm-Torfhorizont.</p> <p>Anmoor: Humusform mit zeitweise «erdigem Gefüge», und bei Sättigung mit einem «schlammigem Gefüge»</p> <p>Gley: Boden mit geprägter Horizontfolge durch das Grundwasser.</p> <p>Torf: Teil zersetztes organischen Material wegen hohem und häufigem Sättigungsgrad des Bodens.</p> <p>Mittlerer Kontaktdruck $[\text{bar}]$: Berechneter Wert aus dem Quotient Radlast durch die Berührungsfläche des Reifens mit dem Boden.</p> <p>Bodenstabilität: Mechanische Eigenschaft für die Anfälligkeit eines Bodens, sich definitiv als Folge einer Belastung zu verformen.</p> <p>Bodenwiderstand: (Siehe Bodenstabilität)</p> <p>Vorbelastung: (Siehe Bodenstabilität)</p> <p>Kohäsive Böden: Böden mit mässigen bis hohen Scherwiderstand, gilt für mittelschwere bis schwere bindige Böden.</p> <p>Druckspannung $[\text{bar}]$: Aktive Kraft in einer bestimmten Bodentiefe pro Flächeneinheit, die durch das Bodenwasser und die Kornaggregate übertragen werden.</p> <p>Druckzwiesel: Zweidimensionale grafische Darstellung der Druckausbreitung (in die Tiefe und senkrecht zur Fahrriichtung und zur Bodentiefe) mit Isobarelinien (Linien mit konstantem Druck).</p> <p>Algorithmen: Gesamtheit der Operationen (Gleichung), die zu einer bestimmten Lösung führt (Ermittlung der Kontaktfläche, der Druckausbreitung im Boden).</p>
<p>Bereifung</p> <p>Normalquerschnitt: Bereifungshöhe/Bereifungsbreite $\geq 0,8$</p> <p>Niederquerschnitt: Bereifungshöhe/Bereifungsbreite zwischen 0,6 und 0,8</p> <p>Terrareifen: Bereifungshöhe/Bereifungsbreite $\leq 0,6$</p> <p>Lastindex (LI): Der Lastindex (LI) ist eine internationale Angabe für die maximale tragbare Last bei einer durch die Reifenhersteller gegebenen Geschwindigkeit, bezeichnet als Geschwindigkeitsindex.</p> <p>Geschwindigkeitsindex (SI): Der Geschwindigkeitsindex (SI) ist eine internationale Angabe der maximalen Geschwindigkeit, für die bei einem bestimmten Last (LI) ein Reifen ausgelegt ist.</p>

Literatur

Arbeitsgruppe Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Hannover 1996.

Diserens E., Steinmann G., 2002. Calculation of pressure distribution in moist arable soils in eastern Switzerland: a simple model approach for the practice. *Environmental Geomechanics – Monte Verità 2002*. Ed. L.Vulliet, L. Laloui, B. Schrefler. EPFL Press. 413-421.

Diserens E., 2002. Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. FAT Berichte Nr. 582. 12 S.

DVWK, 1995. «Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit», (Structural stability of mineral soils used for arable farming. Part I: Mechanical stability under load), Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234.

ETRTO, 1996. Standards Manual. The European Tyres and Rim Technical Organisation.

FAL 2003. Vorbelastungsmessungen von zwölf Standorten im Ackerbaugesamt der Schweiz. (Unveröffentlicht)

Fröhlich O.K., 1934. Druckverteilung im Baugrunde, Verlag Julius Springer, Vienna, 185 S.

Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U., Weisskopf P., 1993. Bodenbeurteilung im Feld. Hsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Horn R., Lebert M., 1994. Soil Compaction and Compressibility. *Soil Compaction in Crop Production*. Ed. B.D. Soane, C. van Ouwerkerk. Elsevier Verlag.

Keller T., Trautner A., Arvidsson J., 2002. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil Till. Res.* 68, 39-47.

Lang H.-J., Huder J., 1982. Bodenmechanik und Grundbau. Springer-Verlag. Berlin, 226 S.

Lebert M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden, (Evaluation and pre-

diction of the mechanical stability of arable soils under load). Band 12. Bayreuther Bodenkundliche Berichte.

Marsili A., Servadio P., Pagliai M., Vignozzi N., 1998. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.* 49, 185-199.

Petelkau H., 1991. Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. *Agrartechnik*, Berlin 41, 2, S. 54-57.

Qasem H., Attinger W., Berli M., Schulin R., 2000. Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trasse der Transitgasleitungen Däniken-Grimsel (TRG 2) und Rodersdorf-Lostorf (TRG 3). Institut für Terrestrische Ökologie der ETH Zürich.

Spiess E., Diserens E., 2001. Zuckerrüben: Erntetechnik und Bodenschutz. FAT-Berichte Nr. 567. 20 S.

Anfragen über das behandelte Thema und über andere landtechnische Probleme sind an die unten aufgeführten Berater für Landtechnik zu richten. Weitere Publikationen und Prüfberichte können direkt bei der FAT (CH-8356 Tänikon) angefordert werden. (Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90).

E-Mail: doku@fat.admin.ch, Internet: <http://www.fat.ch>

- ZH** Merk Konrad, Strickhof,
8315 Lindau, Telefon 052 354 98 11
Blum Walter, Strickhof,
8315 Lindau, Telefon 052 354 98 11
- BE** Jutzeler Martin, Inforama Berner Oberland,
3702 Hondrich, Telefon 033 654 95 45
Marti Fritz, Inforama Rütli und Waldhof,
3052 Zollikofen, Telefon 031 910 52 10
Hofmann Hans Ueli, Inforama Schwand,
3110 Münsingen, Telefon 031 720 11 21
- LU** Moser Anton, LBBZ Schüpfheim,
6170 Schüpfheim, Telefon 041 485 88 00
Hodel René, LMS,
6276 Hohenrain, Telefon 041 914 30 05
Widmer Norbert, LMS,
6276 Hohenrain, Telefon 041 914 30 77
- UR** Landw. Beratungsdienst, Aprostr. 44,
6462 Seedorf, Telefon 041 871 05 66
- SZ** Landolt Hugo, Landw. Schule Pfäffikon,
8808 Pfäffikon, Telefon 055 415 79 22
- OW** Müller Erwin, BWZ Obwalden,
6074 Giswil, Telefon 041 675 16 16
Landwirtschaftsamt, St. Antonistr. 4,
6061 Sarnen, Telefon 041 666 63 58
- NW** Wolf Franz, Landwirtschaftsamt,
Kreuzstr. 2, 6371 Stans,
Telefon 041 618 40 07
- GL** Amt für Landwirtschaft, Postgasse 29,
8750 Glarus, Telefon 055 646 67 00
- ZG** Gut Willy, LBBZ Schluethof,
6330 Cham, Telefon 041 784 50 50
Furrer Jules, LBBZ Schluethof,
6330 Cham, Telefon 041 784 50 50
- FR** Kilchherr Hansruedi, Landw. Schule Grangeneuve
1725 Posieux, Telefon 026 305 58 50
- SO** Wyss Stefan, Landw. Bildungszentrum Wallierhof,
4533 Riedholz, Telefon 032 627 09 62
- BL** Ziörjen Fritz, Landw. Zentrum Ebenrain,
4450 Sissach, Telefon 061 976 21 21
- SH** Landw. Beratungszentrum Charlottenfels,
8212 Neuhausen, Telefon 052 674 05 20
- AI** Inauen Bruno, Gaiserstrasse 8,
9050 Appenzell, Telefon 071 788 95 76
- AR** Vuilleumier Marc, Landwirtschaftsamt AR,
9102 Herisau, Telefon 071 353 67 56
- SG** Lehmann Ueli, LBBZ Rheinhof,
9465 Salez, Telefon 081 758 13 19
Steiner Gallus, Landw. Schule Flawil,
9230 Flawil, Telefon 071 394 53 53
- GR** Föhn Josef, Landw. Schule Plantahof,
7302 Landquart, Telefon 081 307 45 25
- AG** Müri Paul, Berufsbildung, Weiterbildung
und Beratung Liebegg,
5722 Gränichen, Telefon 062 855 86 27
- TG** Baumgartner Christof, Fachstelle
Beratung und Landtechnik, Amriswilerstr. 50,
8570 Weinfelden, Telefon 071 622 10 23
- TI** Müller Antonio, Ufficio consulenza agricola,
6501 Bellinzona, Telefon 091 814 35 53

Landwirtschaftliche Beratungszentrale, Abt. Landtechnik, 8315 Lindau, Telefon 052 354 97 58

Die FAT-Berichte erscheinen in zirka 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement Fr. 50.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: FAT, CH-8356 Tänikon. Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90.

E-Mail: doku@fat.admin.ch – Internet: <http://www.fat.ch> – Die FAT-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapports FAT» erhältlich. – ISSN 1018-502X.