



## Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz

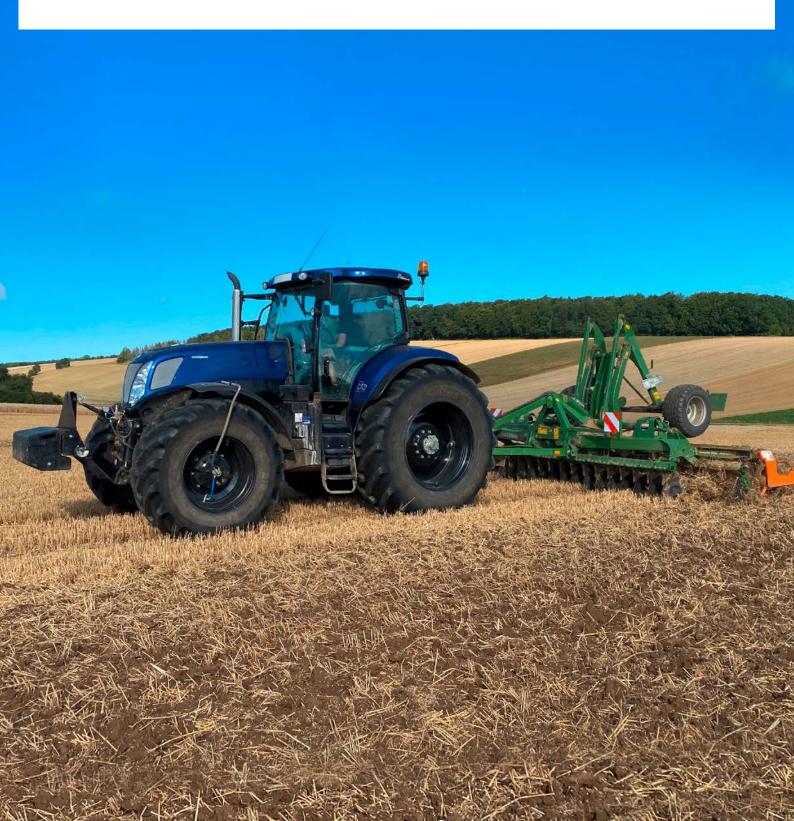




Foto: Arbeitskreis Landwirtschaft, Wasser, Boden im Rhein-Sieg-Kreis (ALWB)

# 3 Vorsorge gegen Bodenverdichtungen

Autoren: Joachim Brunotte, Robert Brandhuber, Thomas Vorderbrügge, Stefan Schrader

### Einführung

Der Boden dient der Kulturpflanze als Widerlager zur Verankerung durch die Wurzeln sowie als Nährstoff- und Wasserspeicher. Er steuert den Gasaustausch mit der Atmosphäre und ist Lebensraum für die Bodenorganismen, die u.a. Vegetationsreste abbauen und deren Inhaltsstoffe den neuen Kulturen wieder verfügbar machen. Er puffert extreme Klimaschwankungen, bindet potenziell pflanzenschädliche Stoffe wie Metalle oder Organika und mindert den schädigenden Einfluss von Stoffeinträgen aus der Atmosphäre.

Die Vielzahl der im Boden i. d. R. gleichzeitig ablaufenden Prozesse ist an den Raum gebunden, den das Bodengefüge zur Verfügung stellt. Im Verlauf der Bodenentwicklung hat sich durch die bodenbildenden Prozesse bei den meisten Böden ein Bodengefüge herausgebildet, das den Pflanzen ausreichende Durchwurzelbarkeit sowie Standsicherheit bei gleichzeitiger ausreichender Versorgung mit Wasser und Nährstoffen gewährleistet. Solche Böden sind i.d.R. gekennzeichnet durch ein Speichervermögen von 100 bis 200 Liter Wasser pro m² sowie einen hohen Anteil an Luft führenden Poren von 10 bis 15 Vol.-%. Diese Luft und Wasser führenden Poren sind gleichmäßig im Profil verteilt, für die Wurzeln gut zu erreichen und gekennzeichnet durch eine hohe Stabilität und Durchgängigkeit, manche bis tief in den Unterboden. Den Rest des Bodens bilden organische Substanz

(Definition organische Substanz/Humus im Kapitel 2, S. 12), mineralische Festsubstanz und das daran nicht pflanzenverfügbar gebundene Wasser, das sogenannte "Totwasser".

Durch Einlagerung von feinen Bodenteilchen, bspw. Ton, in die Hohlräume können die Luft und Wasser führenden Poren enger werden. Dadurch kann der Gas- und Wasserhaushalt im Laufe der Zeit so stark beeinträchtigt werden, dass das Wasser im Boden nur noch extrem langsam versickert oder sich sogar aufstaut. Dies ist typisch für die sogenannten Stauwasserböden, die Pseudogleye.

Die Bodenkunde bezeichnet diesen Prozess des Verlustes an Hohlräumen durch Um- und Einlagerung von Bodenteilchen und deren Verfestigung durch physikochemische Prozesse als Einlagerungsverdichtung. Weiterhin sind Böden aber i. d. R. in tieferen Bereichen (80 bis 120 cm), im Vergleich zu der Tiefe von 40 bis 80 cm, häufig kompakter und haben weniger Luft und Wasser führende Poren. Dies ist vor allem durch das Eigengewicht des Bodens bestimmt. Die Bodenkunde nennt diesen Vorgang Sackungsverdichtung.

Im Zuge der Bodenbewirtschaftung werden Böden ganz bewusst gelockert und verdichtet. So ist die Rückverfestigung überlockerter Böden eine notwendige Maßnahme zur Saat,



#### Bodenoberfläche

- Mulchauflage
- offene Bioporen

#### Oberkrume

- viele tiefreichende Bioporen
- gut aggregiert, locker

#### Unterkrume

- Aggregate +/- scharfkantig
- etwas kompakt daher tragfähig
- ausreichende biog. Perforierung
- unauffällige Wurzelverteilung

#### Krumennaher Unterboden

- etwas kompakt tragfähig
- ausreichende biog. Perforierung
- unauffällige Wurzelverteilung

#### Unterboden

unverdichtet, viele Bioporen

Abb. 3.1: Anzustrebendes Bodengefüge (HARRACH, 2011; Foto: Th. Vorderbrügge)

Die Dichte eines gepflügten, stark gelockerten Bodens nimmt auch innerhalb des Jahresablaufes deutlich zu: Je länger die Lockerungsmaßnahme verstrichen ist, umso fester, bzw. dichter lagert dieser Boden. Bodenverdichtung ist zunächst nur eine Erhöhung der Masse pro Volumeneinheit (g/cm³). Sie ist unkritisch, solange das Porenvolumen nur so stark komprimiert wird, wie der Boden seine Funktionen unbeschadet erfüllen kann. Erst wenn der Boden über seine Belastbarkeit hinaus weiterverdichtet wird, entstehen Bodenschäden im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG; BMU, 1998), die Bodenfunktionen sind dann beeinträchtigt.

Ziel des Bodenschutzes ist die Erhaltung der Bodenfunktionen, d.h. die Bewirtschaftung eines Bodens ist aus Gründen der Vorsorge so zu gestalten, dass die Bodenfunktionen nicht negativ beeinträchtigt werden. Diese Forderung gilt immer, zunächst unabhängig von der Verdichtungsempfindlichkeit der Standorte.

Die Vorsorgemaßnahmen lassen sich grundsätzlich in drei Strategien gliedern, die sowohl boden- wie auch geräteseitig ansetzen:

- Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen berücksichtigen vor allem die Bodenbearbeitungsintensität und die Fruchtfolge
- 2. Bei der Gestaltung der Arbeitsverfahren geht es vor allem um Kampagneauslastung und Fahrwerkauswahl von Erntemaschinen.
- Zu den technischen Möglichkeiten z\u00e4hlen ma\u00dfgeblich Fahrzeugparameter wie Rad-/Band-Fahrwerke, Reifeninnendruckverstellung und Sensorik zur Online-Erfassung kritischer Bodenzust\u00e4nde.

Bodenfunktionen sind beeinträchtigt, wenn ein Boden infolge der Bewirtschaftung so dicht gelagert ist, dass Kulturpflanzen hinter ihrer ansonsten möglichen Entwicklung zurückbleiben, der Gas- und Wasseraustausch deutlich eingeschränkt ist oder Niederschlag nicht mehr als Bodenwasser infiltriert, sondern auf dem Boden abfließt und Bodenmaterial umgelagert wird

Weiterhin kann zunehmende Bodenverdichtung zur Beeinträchtigung der Lebensraumfunktion führen, wodurch die biologische Vielfalt im Boden derart verändert wird, dass es zu einer Einschränkung ökosystemarer Dienstleistungen kommt oder diese gar völlig ausfallen (BEYLICH ET AL., 2010; SCHRADER, 2001). Im Gesetzestext zur Guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft, § 17 BBodSchG (BMU, 1998) findet sich solch eine erklärende Ausführung nicht. Dort findet sich nur die Formulierung "Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen

Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendruckes sollen so weit wie möglich vermieden werden".

Eine Verdichtung ist jedoch ein Prozess, der zu einem erhöhten Dichtezustand führt. Weiterhin ist eine Verdichtung im Boden immer vorhanden, sie ist praktisch unvermeidbar u. a. aufgrund der Schwerkraft, aber nicht zwingend schädlich für die Bodenfunktionen. Gemeint hat der Gesetzgeber also die Intensität einer Verdichtung, die die Bodenfunktionen spürbar und mit gewisser Dauerhaftigkeit beeinträchtigt und deren Auswirkungen andere Schutzgüter (Wasser, Naturschutzgebiete, biologische Vielfalt etc.) gefährden (VORDER-BRÜGGE, 2004).

Den Grad einer Verdichtung, ab dem Bodenfunktionen beeinträchtigt sind, hat der Gesetzgeber nicht definiert (BECKER &TIEDEMANN, 2012). Aus Sicht der Vorsorge ist es also Ziel der Guten fachlichen Praxis, ein Bodengefüge zu schaffen oder zu erhalten, das die Bodenfunktionen sichert und Gefährdungen anderer Umweltgüter ausschließt (Abb. 3.1). So ist etwa bei der Bodenbearbeitung die Lockerungsintensität so vorzunehmen, dass die Tragfähigkeit des Bodens erhalten bzw. verbessert wird. Letzteres gelingt in der Regel nur durch eine zusätzliche biologische Stabilisierung mit Pfahlwurzeln. Weiter hat Vorsorge die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit zu berücksichtigen: Fahrzeugparameter sind an kritische Bodenzustände anzupassen, auch wenn die Flächenleistung dabei sinkt.

#### Formen der Verdichtung und ihre Ursachen

Oberflächenverdichtung – entsteht vor allem in schluffreichen Substraten mit labilem Bodengefüge, wenn das Gefüge durch Regentropfen bei Starkregen zerschlagen wird (Verschlämmung = Verdichtung der obersten 0 bis 3 mm, s. Abb. 3.1a), Befahren oder durch übermäßige mechanische Zerkleinerung bei der Bodenbearbeitung. Dies alles führt zum Zerfall von Aggregaten und durch nachfolgende Austrocknung zur Verkrustung. Die Krusten sind häufig nur wenige mm bis wenige cm stark, unterbrechen aber den Gasaustausch, behindern die Infiltration der Niederschläge und fördern den Oberflächenabfluss. Das Zerschlagen der Aggregate und die anschließende Umlagerung mit dem Niederschlagswasser führen häufig zu einer Trennung der Schluff- und Tonteilchen. Die dünnen Schichten werden meistens als Kruste eingearbeitet und bilden dann in der Krume Trennschichten und Engpässe für den Gas- und Wasseraustausch. Die Trennung von Schluff- und Tonteilchen bleibt dauerhaft erhalten, sofern nicht durch intensive biologische Aktivität und Lebendverbauung eine Aggregatneubildung erfolgt.

Krumenverdichtung – erstreckt sich auf die gesamte Krume bzw. auf größere Partien derselben. Ursache ist z.B. Bodenbearbeitung oder Befahrung im zu nassen Zustand oder Verpressung des Krumenmaterials in Reifenstollen bei ungenügender Wiederauflockerung. Eine Krumenverdichtung mindert vor allem die Nährstoffaufnahme und führt zu



Abb. 3.1a: Oberflächenverschlämmung ist eine Verdichtung der obersten 0-3 mm mit einer stark herabgesetzten Infiltrationsleistung. (Foto: J. Brunotte)

Wasserstau an der Bodenoberfläche, häufig selbst bei Sanden. Insbesondere die Verpressung des nassen Bodenmaterials durch die Stollen kann zu extrem dichten Bodenaggregaten führen (Aggregatverdichtung). Dichte Aggregate werden nur an der Oberfläche umwurzelt, eine Durchwurzelung des Aggregatinneren findet nicht statt.

Dadurch sind im Inneren der Aggregate gebundene Nährstoffe nicht verfügbar und der Gasaustausch wird behindert (reduktive Bedingungen). Diese Aggregate werden durch natürliche Prozesse (Frost, Trockenheit) nicht gänzlich aufgelockert und auch eine mechanische Bodenbearbeitung führt nur zu einer mechanischen Zerkleinerung, aber nicht zu einer Lockerung, damit auch das Aggregatinnere wieder durchwurzelt werden kann.

Verlassene Horizonte – diese Form einer Verdichtung findet sich häufig an Standorten, auf denen im Laufe der Bewirtschaftung die Pflugtiefe langfristig reduziert wurde, statt vormals 35 cm etwa nur noch 28 cm. Weiterhin kann auch der Wechsel von der wendenden zur nichtwendenden Bodenbearbeitung zu einer "verlassenen Krume" führen, wenn die Bearbeitungstiefe abrupt von 30 auf 15 cm vermindert wird. Diese Zonen, z.B. im Übergangsbereich Krume/ Unterboden, sind kompakt gelagert und beeinträchtigen die Durchwurzelung sowie den Stoffaustausch. Eine mechanische Lockerung dieser Horizonte führt häufig zu einer weiteren Verdichtung statt zur erhofften Gefügeverbesserung. Am erfolgversprechendsten ist eine Bodenbearbeitung mit jährlich wechselnder Tiefe und einer steten langsamen Rücknahme der Bearbeitungstiefe. Dies ermöglicht am ehesten eine biogene Durchporung (Regenwürmer, Pfahlwurzeln), die im Laufe der Zeit die Durchwurzelung der "verlassenen

Bearbeitungshorizonte" fördert und gleichzeitig für eine Stabilisierung der Bodenstruktur sorgt.

Krumenbasisverdichtung (auch Pflugsohlenverdichtung genannt) - an der Basis der Krume ausgebildet. Position, Ausprägung und zeitliche Veränderung sind deutlich zu erkennen, z.B. in der Statuserhebung, in Südniedersachsen (siehe Abb. 3.11 auf S. 41). Sie entsteht durch Druck- und Schmierwirkung (Schlupf; Einregelung von Bodenteilchen) vom Pflug und den Rädern, insbesondere wenn sie immer in einer bestimmten Tiefe laufen. Sie kann den Gas- und Wasseraustausch sowie die Durchwurzelung beeinträchtigen. Vor allem Hackfrüchte reagieren sehr sensibel (Beinigkeit bei Zuckerrüben) auf eine Krumenbasisverdichtung. Eine gewisse Ausprägung ist allerdings tolerierbar, da sich hohe Lasten dort gewissermaßen abstützen und eine eventuelle Schädigung des Unterbodens gemindert wird - vorausgesetzt die Durchlässigkeit dieses Horizontes für Wasser, Luft, Wurzeln und Regenwürmer ist gewährleistet.

Unterbodenverdichtungen - sind Verdichtungen direkt unterhalb der Krume (krumennaher Unterboden) und im tieferen Unterboden. Hier ist zunächst festzustellen, ob kompakte Bereiche, die die Durchwurzelung behindern und den Stoffaustausch beeinträchtigen, nicht durch die Bodenentwicklung, z. B. Staunässe bei Pseudogleyen, verursacht wurden - pedogene Verdichtung. Häufig sind diese Verdichtungen aber, gerade im krumennahen Unterboden, eine Folge der Bewirtschaftung - anthropogene Verdichtung. Die Ursache einer Unterbodenverdichtung (anthropogen oder pedogen) lässt sich anhand der Abfolge der Schichten (von oben nach unten) klären: Liegt die dichtere Schicht im Unterboden unterhalb einer lockeren Schicht, dann handelt es

sich bei natürlichen Böden eindeutig um eine pedogene Verdichtung, da der Prozess einer anthropogenen Verdichtung keine lockeren Bereiche "überspringen" kann. Dies gilt aber nicht für geschüttete Böden im Rahmen einer Rekultivierung. Ursache für anthropogene Verdichtungen im Unterboden (häufig in 30/40 cm Tiefe, im Einzelfall bis zu 50 cm Tiefe) sind mechanische Belastungen durch den Lasteintrag der unterschiedlichsten Maschinen, vor allem bei Ernte- und Transportarbeiten.

#### **Definition einer Verdichtung**

Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass die unterschiedlichsten Formen einer Verdichtung auftreten können, dass es "die Verdichtung" nicht gibt und nicht jede Verdichtung auch gleich Bodenfunktionen beeinträchtigt. Häufig wird der Begriff "Schadverdichtung" verwendet, wenn zum Ausdruck gebracht werden soll, dass eine Verdichtung offensichtlich den Ertrag mindert oder die Bewirtschaftung erschwert, was an Wachstumsstörungen der Kulturpflanze oder Pfützenbildung auf der Bodenoberfläche sichtbar wird. Der Begriff "Schadverdichtung" wird in Praxis und Beratung häufig gebraucht, um damit eine evtl. Schädigung von Bodenfunktionen anzudeuten. Das BBodSchG selbst und auch die BBodSchV (BMU, 1999) verwenden diesen Begriff allerdings nicht.

Im BBodSchG (§ 2, Abs. 3) wird im Rahmen der Gefahrenabwehr der Begriff der "Schädlichen Bodenveränderung - (SBV)" geführt. Dabei handelt es sich um "Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen: Der Gesetzgeber hat allerdings nicht von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, in der BBodSchV Kriterien für die Feststellung einer SBV durch Bodenverdichtung zu benennen. Ob also eine Bodenverdichtung tatsächlich eine SBV im Sinne des Gesetzes ist, wäre nach den allgemein gültigen Vorgaben des BBodSchG §§ 2 und 4 zu prüfen.

Zunächst wäre festzustellen, ob ein nicht pflichtgemäßes Verhalten gemäß §4 Abs. 1 (BBodSchG) vorliegt, welches eine nachteilige Veränderung einer der in § 2 Abs. 2 aufgeführten Bodenfunktionen verursachen kann. Darüber hinaus müsste die zu erwartende Beeinträchtigung geeignet sein, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für Rechtsgüter des Einzelnen oder der Allgemeinheit herbeizuführen. Erst wenn beide Voraussetzungen erfüllt sind, kann im Sinne des Gesetzes von einer Verdichtung als SBV gesprochen werden.

Nicht ganz unproblematisch ist in diesem Zusammenhang der Nachweis einer Erheblichkeit, d.h. eine bestimmte Intensität, Dauerhaftigkeit und räumliche Ausdehnung der Verdichtung müssten erreicht sein. LEBERT ET AL. (2004) haben Vorschläge gemacht, welche Ausprägungen von bodenphysikalischen Kennwerten im Unterboden Anhaltspunkte

für das Vorliegen einer SBV durch Bodenverdichtung liefern können (Luftkapazität unterhalb 5 Vol.-% in Verbindung mit einer gesättigten Wasserleitfähigkeit kleiner 10 cm/d). Aus bodenbiologischer Sicht stellten BEYLICH ET AL. (2010) anhand einer Literaturauswertung grundsätzlich negative Effekte auf die mikrobielle Biomasse und C-Mineralisierung bei Bodendichten oberhalb von 1,7 g/cm³ fest.

Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BMU, 1998) nennt im § 17 allgemeine Anforderungen an die Vorsorge zur Vermeidung von Bodenverdichtungen in Form der Grundsätze zur Guten fachlichen Praxis. Verbindliche und konkrete Prüf- und Maßnahmenwerte, die beispielsweise zur Beurteilung der Belastung durch Schadstoffe bestehen, existieren für die Beeinträchtigung des Bodengefüges durch Verdichtung nicht. Dies gilt sowohl für die Vorsorge nach "Guter fachlicher Praxis" als auch für die Gefahrenabwehr nach Eintritt von schädlichen Bodenveränderungen durch Verdichtungen. Der Grund liegt darin, dass sowohl die Beeinträchtigung der Bodenfunktionen als auch der Zusammenhang zwischen einer Bodenschadverdichtung und der Betroffenheit der Schutzgüter von zahlreichen, auch zeitlich variablen Randbedingungen abhängt. Es ist somit kaum möglich, allgemein rechtsverbindliche "Grenzwerte" festzuschreiben.

Es ist aber sehr wohl möglich, eine schädliche Bodenveränderung in Form einer Schadverdichtung anhand bestimmter Kriterien (z.B. nach LEBERT ET AL., 2004; CRAMER, 2006; BEYLICH ET AL., 2010) für bestimmte Substrate (Tone und Schluffe, außer Sande) einzugrenzen. Demnach liegen Anhaltspunkte für eine Schadverdichtung dann vor, wenn alle in Tabelle 3.1 aufgeführten Kriteriengruppen zeitgleich erfüllt sind.

Grundsätzlich kann eine bestehende Schadverdichtung nur durch eine Gefügeansprache vor Ort diagnostiziert werden (siehe S. 36). Ob nach einer Überschreitung der Schadensschwellen bereits eine Bedrohung für die Schutzgüter Wasser, Bodenleben oder Mensch vorliegt, ist im Einzelfall zu entscheiden. Liegen Anhaltspunkte für eine entsprechende Diagnose vor, können im Rahmen der Gefahrenabwehr notwendige Untersuchungen und ggf. Maßnahmen angeordnet bzw. durchgeführt werden.

Tab. 3.1: Kriterien zur Ermittlung einer Schadverdichtung (LEBERT ET AL., 2004)

Kriterien	Schadensschwellen
Luftkapazität (LK)	< 5 Vol-%
gesättigte Wasserleitfä- higkeit (kf)	< 10 cm/Tag
Feldgefügeansprache der  » effektiven     Lagerungsdichte  » Packungsdichte  » Spatendiagnose	Klassen 4 oder 5 (nach Boden- kundlicher Kartieranleitung, AD-HOC-AG BODEN, 2005) Klassen 4 oder 5 (nach DIN 19682-10, 1998) Klassen 4 oder 5 (nach DIEZ & WEIGELT, 2000)

Da die Vermeidung von Schadverdichtungen anhand von Wertevorgaben nicht sinnvoll möglich ist, bildet die Gute fachliche Praxis und speziell die Vorsorge die eigentliche Grundlage zum Schutz vor Bodenverdichtungen. Damit wird klar, dass die jeweils aktuellen Entwicklungen der Technik der Guten fachlichen Praxis und des Wissensstandes anzupassen sind, um Bodenverdichtungen zu vermeiden.

#### Ursachen: Auslösende Faktoren für Verdichtung durch Befahren

Voraussetzung für eine Analyse sowie für eine Problemlösung ist zunächst das Verständnis der Zusammenhänge zwischen dem maschinenbedingten Lasteintrag (mechanische Bodenbelastung), dem daraus resultierenden Druck auf den Boden (Kontaktflächendruck), die Weitergabe des Druckes im Boden (Bodenbeanspruchung; Bodendruck) und der daraus folgenden Änderung im Bodengefüge, der Bodenverdichtung (s. Abb. 3.2).

Die mechanische Bodenbelastung wird mit der Radlast in t und/oder mit dem Kontaktflächendruck in der Berührungsfläche Laufwerk/Boden in kPa (100 kPa = 1 bar) angegeben.

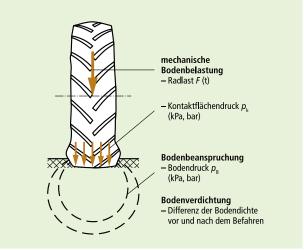


Abb. 3.2: Belastung, Beanspruchung und Verdichtung des Bodens (SOMMER, 1985)

#### Belastung des Bodens

Die Beurteilung der tatsächlichen Bodenbelastung muss folgende Faktoren berücksichtigen: Radlast, Kontaktflächendruck, Überrollhäufigkeit einzelner Bereiche innerhalb eines Schlages und Spurflächenanteil.

Tab. 3.2: Technische Daten (gemessen) von Traktoren, Ernte- und Transportmaschinen (mit gefülltem Behälter, Korntank, Bunker) (BRUNOTTE, 2012)

Maschine	Reifengröße v: Vorderachse h: Hinterachse		Rad- last [t]	Reifeninnen- druck [kPa] [bar] Acker (10 km/h)	Straße (40 km/h)	Kontaktfläche [cm²] Acker (10 km/h)	mittlerer Kontaktflächen- druck [kPa]
Traktor, 120 kW	V	540/65 R24	1,5	60 (0,6)	80 (0,8)	3.300	45
mit angebautem Grubber, 3 m	h	650/65 R38	2,5	80 (0,8)	100 (1,0)	5.210	48
Mähdrescher	v	710/70 R42	9,5	200 (2,0)	200 (2,0)	6.740	141
240 kW, 7,5 m	h	540/65 R30	2,5	80 (0,8)	120 (1,2)	3.780	66
Feldhäcksler mit	v	800/65 R32	6,1	110 (1,1)	210 (2,1)	6.730	91
Maisgebiss 340 kW, 6 m	h	710/50-26.5	1,9	80 (0,8)	80 (0,8)	2.810	68
Zuckerrüben-	V	800/65 R32	10,5	250 (2,5)	160 (1,6)	7.140	147
roder 340 kW, 6-reihig	h	1050/50 R32	12,5	280 (2,8)	160 (1,6)	9.230	135
Traktor 120 kW	V	540/65 R24	2,5	100 (1,0)	140 (1,4)	3.300	76
	h	650/65 R38	3	80 (0,8)	100 (1,0)	5.520	54
Häckselgutwagen	V	710/50 R26.5	5,5	160 (1,6)	280 (2,8)	4.540	121
40 m <sup>3</sup>	h	710/50 R26.5	5,5	160 (1,6)	280 (2,8)	4.540	121
Traktor 180 kW	V	600/65R34	2,54	80 (0,8)	100 (1,0)	4.090	62
	h	710/70R42	4,3	80 (0,8)	100 (1,0)	6.480	66
Gülletankwagen 15 m³	V	750/60R-30.5	5,76	100 (1,0)	200 (2,0)	5.330	108
	h	750/60R-30.5	5,4	100 (1,0)	200 (2,0)	5.210	104

Werte in der Praxis können abweichen je nach Hersteller und Betriebskennung



Die statische Radlast ist, im Gegensatz zur eigentlich maßgebenden dynamischen Belastung (oft ein Mehrfaches der statischen Radlast; vertikaler Lasteintrag plus Scherung durch Schlupf), durch Wägung relativ leicht zu bestimmen. Rad- bzw. Achslast bilden die Grundlage zur Bestimmung des Lasteneintrages in der Spur. Die Radlasten nehmen mit steigender Leistungsfähigkeit der Maschinen und Fahrzeuge tendenziell zu. Die damit i. d. R. verbundenen größeren Arbeitsbreiten führen dagegen zu einer Verringerung der zurückgelegten Fahrstrecken je Hektar.

Der höheren Bodenbelastung durch zunehmende Radlasten steht also eine Verringerung des belasteten Bodenareals gegenüber. Das bedeutet: Die Kenngrößen Spurflächenanteil, Spurpositionen und Überrollhäufigkeit sind notwendige Ergänzungen zu den Faktoren Radlast und Kontaktflächendruck (bzw. Reifeninnendruck). So können Produktionsverfahren hinsichtlich Bodenbelastung differenziert beurteilt werden (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007; VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE siehe S. 43 und Fallbeispiel 4, S. 58).

Für das Verständnis des Zusammenhanges zwischen Druck auf den Boden und Wirkung des Druckes im Boden ist die Kenngröße mittlerer Kontaktflächendruck (kPa) in der Fahrspur von großer Bedeutung. Sie ergibt sich als Quotient aus Radlast und der Größe der Radaufstandsfläche.

In Tabelle 3.2 sind für die heute wichtigsten Ernteverfahren gemessenen Daten zum Lasteintrag auf dem Feld aufgeführt. Diese technischen Daten sind repräsentativ, da sie die heute übliche Landtechnik abbilden und bei Abmessungen und Gewichten die Vorgaben der StVZO für die Straßenfahrt berücksichtigen. In Einzelfällen können geringe Abweichungen von 0,5 bis 1 t Last bzw. 0,2 bis 0,5 bar Reifeninnendruck vorliegen – die Auswirkungen auf die Bodenstruktur wären dann aber marginal.

Bei den Radlasten handelt es sich um statische Werte, die auf einer mobilen Waage ermittelt wurden. Die Reifeninnendrücke pi sind für die benötigte Tragfähigkeit nach Reifendrucktabellen der Reifenhersteller eingestellt (zwischen den Herstellern kann es Abweichungen geben). Laut VDI-Richtlinie 6101 (VDI, 2014) gelten als Richtwerte:

- » auf gelockertem oder feuchtem Acker (Frühjahr) pi < 100 kPa (100 kPa = 1 bar),
- auf abgesetztem oder trockenem Boden (Sommer/ Herbst) pi < 200 kPa.

Diese Richtlinie ist sowohl für die Landmaschinenindustrie, als auch für Beratung und Landwirtschaft eine richtungsweisende Vorgabe, um den "Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden" zu gestalten.

Die in der Tabelle angegebenen Kontaktflächen sind für die angegebenen Lasten in einem standardisierten Sandbett ermittelt worden. Weil das Messen der Kontaktfläche mitunter sehr aufwendig ist, existieren als Näherungsverfahren verschiedene Modelle. Da der Reifeninnendruck pi besonderen Einfluss auf den Kontaktflächendruck hat, sind empirische Gleichungen entwickelt worden (BOLLING & SÖHNE, 1982), deren allgemeine Formel vereinfacht lautet:

$$pk = 1,25 x pi.$$

In erster Näherung liegt der mittlere Kontaktflächendruck auf fester Fahrbahn für Diagonalreifen um den Faktor 1,25 höher als der Reifeninnendruck. Wegen der stärkeren Einfederung und demzufolge vornehmlich längeren Aufstandsfläche steigt der mittlere Kontaktflächendruck sowohl auf fester Fahrbahn als auch auf dem Feld nicht linear zur Radlast. So bedeutet die Radlaststeigerung (Tab. 3.2) von 60 kN (rel. = 100 %) auf 90 kN (rel. = 150 %) für den mittleren Kontaktflächendruck - etwa auf gegrubbertem Acker - eine Zunahme von 130 kPa (rel. = 100) auf 163 kPa (rel. = 125 %).

Da die exakte Kontaktfläche schwer zu bestimmen ist, wird nach RENIUS, 1987 - zum Vergleich von Maschineneinheiten - die Hilfsgröße Projektionsdruck als der Quotient aus Radlast und Projektionsfläche des Reifens verwendet. Tatsächlich stehen auf fester Fahrbahn Projektionsdruck und Kontaktflächendruck in einem engen Zusammenhang, nicht dagegen auf nachgiebigem Boden (OLFE, 1990).

Diserens hat in seinem Modell TASC (= Tyres/Tracks and Soil Compaction; DISERENS, 2002) eine Vielzahl von tatsächlichen Messungen zur Kontaktfläche hinterlegt. Für Breitreifen ist die folgende Formel abgeleitet:

$$A = (0,420 \times B \times D) - (1.120,680 \times pi) + (0,370 \times F)$$

A: Kontaktfläche [cm<sup>2</sup>]

B: Reifenbreite [cm]

D: Reifendurchmesser [cm]

pi: Reifeninnendruck [bar]

F: Radlast [kg]

TASC ist eine Excel-Anwendung, die darüber hinaus auch die Bodenbeanspruchung durch Rad- und Raupenfahrwerke je nach Bodeneigenschaften und Belastungen beurteilt. Zu den erforderlichen Eingabeparametern gehören:

- die Körnung des Bodens,
- die Oberbodenfestigkeit,
- die Auflockerungstiefe,
- die Reifenbreite,
- der Reifendurchmesser,
- die Radlast und
- der Reifeninnendruck

Die Anwendung eignet sich vorwiegend für Bereifungen mit Traktion-Profil auf abgesetzten Ackerböden mit einer verfestigten Pflugsohle zwischen 20 und 25 cm (DISERENS & SPIESS, 2005).

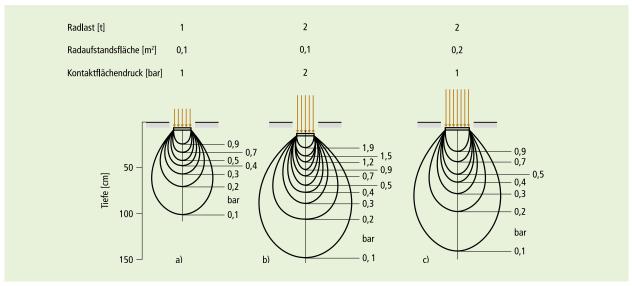


Abb. 3.3: Druckzwiebeln in drei verschiedenen Spuren (BOLLING & SÖHNE, 1982)

Grundsätzlich führt jede Art der Bewirtschaftung zu einer Verdichtung der Krume. Dieser kann durch geeignete Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Fruchtfolgegestaltung wieder entgegen gewirkt werden.

Aus der Analyse des Lasteintrages sind allerdings für den Unterboden insbesondere bei feuchtem Bodenzustand folgende Arbeitsgänge kritisch:

- Das Fahren in der Furche bei der Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug
- Ernte von Massengütern (Silomais, Kartoffeln, Zuckerrüben), wo hohe Radlasten und häufige Überrollungen der gleichen Flächen auftreten
- Ausbringung von organischen Düngern durch Fahrzeuge mit hohen Lasten und Reifeninnendrücken, insbesondere im Frühjahr
- Mähdrescher mit großer Arbeitsbreite und großem Korntank, sowie schmaler Bereifung (620er) zur Einhaltung der maximalen Fahrzeugbreite für die Straßenfahrt.

#### Beanspruchung des Bodens

Die infolge der Radlasten in Kombination mit der Bereifung auftretenden Kontaktflächendrücke verursachen im Boden Drücke (mechanisch: Spannungen), deren Verlauf im Boden mit den sogenannten "Linien gleichen Bodendruckes" auch als "Druckzwiebel" bezeichnet wird. Grundlegende Arbeiten hierzu hat SÖHNE (1953) veröffentlicht. Er berechnete die Spannungen im Boden und veranschaulichte durch die erwähnten "Druckzwiebeln" den Verlauf des Druckes im Boden (Abb. 3.3).

Für die in Abb. 3.3 angeführten Beispiele einer senkrecht wirkenden Radlast - die Berücksichtigung der Zugkraft hätte Druckzwiebeln zur Folge, die zur Fahrtrichtung schräg nach

hinten verlaufen - sind einige grundsätzliche Aussagen abzuleiten (SOMMER, 1985):

- Der Bodendruck wird mit größerer Tiefe abgebaut, da er von immer mehr Bodenpartikeln "mitgetragen" wird. Im Beispiel a) ist der Kontaktflächendruck von 1,0 bar in der Fahrspur auf den Bodendruck von 0,1 bar in 1 m Tiefe abgesunken.
- Bei gleichem Kontaktflächendruck von 1,0 bar hat eine größere Radlast von 2 t im Beispiel c) eine tiefere Fortpflanzung der 0,1-bar-Druckzwiebel im Vergleich zur geringeren Radlast von 1t im Beispiel a) zur Folge. Im Fall b) ist der Bodendruck erst in 1,5 m Tiefe auf 0,1 bar abgefallen.
- Das bedeutet, dass für die Tiefenwirkung des Bodendruckes bei gleichem Kontaktflächendruck die Radlast maßgebend ist. Schwere Maschinen, Geräte und Transportfahrzeuge beanspruchen den Boden bis in größere Tiefen, auch wenn sie im Vergleich zu leichter Technik denselben Kontaktflächendruck aufweisen.
- Bei gleicher Radlast ist der Kontaktflächendruck für das Ausmaß des Bodendruckes in der Ackerkrume ausschlaggebend. Das bedeutet, dass bei unveränderter Radlast die Umrüstung von einem schmalen Reifen (Fall b) auf einen breiteren oder Zwillingsreifen (Fall c) weniger Auswirkungen auf die Tiefenwirkung zur Folge hat, als vielmehr auf die Minderung des Bodendruckes in Oberflächennähe. Erst durch "überproportionale" Radverbreiterung (Super-Breitreifen) lässt sich mit erheblich reduziertem Kontaktflächendruck auch die Tiefenwirkung verringern.

Eine der Bedingungen der Anwendbarkeit des Models von SÖHNE (1953) ist die Gleichmäßigkeit der bodenmechanischen Eigenschaften über das gesamte Bodenprofil - diese Annahme weicht stark von der im Feld vorhandenen Horizontierung von Krume und Unterboden ab. In ihren Untersuchungen stellten LAMANDÉ & SCHJØNNING (2011a) Für die Beanspruchung des Bodens und die Bodentragfähigkeit ist die aktuelle **Bodenfeuchte** hauptsächlich verantwortlich – die Festigkeit des Bodens wirkt sich auf die Form der Druckzwiebeln aus. Bei hartem, trockenem, dicht gelagertem Boden haben die Linien gleicher Hauptspannung annährend Kreisform. Je nachgiebiger der Boden wird, umso schlanker werden die Druckzwiebeln. Durch das seitliche Ausweichen des Bodens konzentriert sich der Druck zur Lastachse, und die Druckzwiebeln reichen tiefer herab. Diese Aussagen gelten für homogenen Boden – bei Berücksichtigung der Horizonte im Feld gibt es allerdings Abweichungen.

Auch Untersuchungen von LAMANDÉ & SCHJØNNING (2011b) belegen, dass die Übertragung von Bodendrücken in Böden sehr stark vom Wassergehalt abhängt. Nach dem modifizierten Elastizitätsmodell von FRÖHLICH (1934) gilt, dass für eine definierte aufgetragene Last auf einen definierten Boden eine Abnahme der Bodenfestigkeit, verursacht durch einen Anstieg des Wassergehaltes, zu einer höheren Konzentration des Druckes unterhalb der Mitte der Last und zu einer tieferen Ausbreitung des Druckes führt.

Am Beispiel eines 6-reihigen Zuckerrübenroders wird die Veränderung der Trockenrohdichte durch Befahrung bei trockenen und feuchten Bodenbedingungen deutlich (Abb. 3.4). Die Niederschlagsverteilung in der Region und die daraus resultierende aktuelle Bodenfeuchte vor Ort gibt die Feldarbeitstage bzw. Befahrbarkeitstage vor. Stark davon abhängig sind der Auslastungsgrad der Maschinen und damit das Risiko, den Boden bei feuchten Bedingungen zu schädigen (KTBL, 2011).

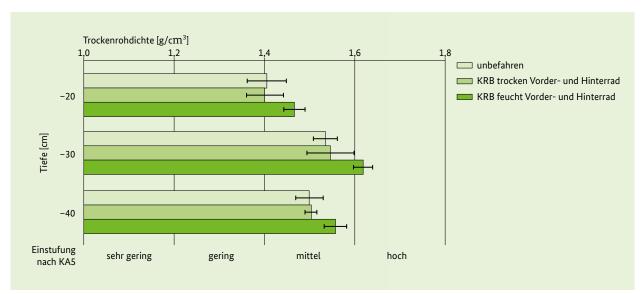


Abb. 3.4: Befahrung mit 6-reihigem Zuckerrübenroder (Köpfrodebunker = KRB) – Einfluss auf die Trockenrohdichte bei unterschiedlicher Bodenfeuchte (KTBL, 2012)

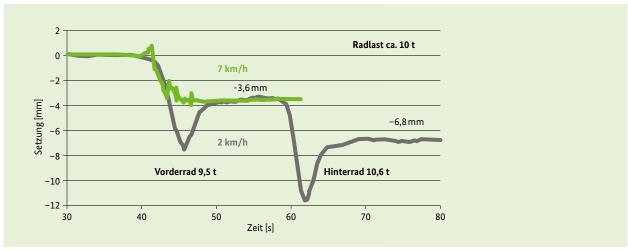


Abb. 3.5: Setzung in 40 cm Tiefe bei 2-facher Überrollung mit 2 und 7 km/h Fahrgeschwindigkeit (BRUNOTTE ET AL., 2006)

Die Druckfortpflanzung hängt aber auch von der zeitlichen Dauer der Belastung ab. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit reichen die Linien gleichen Druckes (Druckzwiebeln) weniger tief in den Boden. Schnelleres Fahren bedeutet demnach mehr Bodenschonung, vorausgesetzt, die Tragfähigkeit entspricht mindestens dem wirksamen Druck (Spannung) - dargestellt in Abb. 3.5 mit Hilfe der Bodensetzung, weil damit der elastische und der plastische Anteil der Verformung deutlich werden. Die normalerweise übliche Bodendruckmessung (Schlauchdrucksonden) stellt im Vergleich zur Setzungsmessung eine Momentaufnahme dar und würde die Veränderungen im Boden nicht anzeigen.

Bei langsamer Fahrgeschwindigkeit (2 km/h) wird die Setzung jedes Lasteintrages deutlich - unter dem Vorderrad werden 4 mm elastische und 3,6 mm plastische Verformung gemessen. Für den Bereich des Hinterrades werden 5 mm elastische und 6,8 mm plastische Verformung angezeigt. Bei schneller Fahrt (7 km/h) sind die Peaks der einzelnen Achsen hingegen nicht zu erkennen und die plastische Verformung ist mit 3,6 mm nur halb so hoch (siehe auch S. 45 ff.).

Schließlich kommt der Überrollhäufigkeit (= die Anzahl der Achsen/Räder, die den Boden überrollen: z.B. 1 Überfahrt mit einem Gülletankwagen mit Tandemfahrwerk bedeutet 4 Überrollungen) besondere Bedeutung zu. Wird der Boden durch mehrfaches Befahren in derselben Spur mit gleicher Radlast und gleichem Kontaktflächendruck wiederholt beansprucht, entspricht dies einer stufenweisen Erhöhung der Radlast.

Die Beanspruchung des Bodens steigt so, als wäre bei jeder Überfahrt die Radlast gestiegen (Abb. 3.6). Wird also von 2 auf 3 Achsen übergegangen und das Gesamtgewicht der Maschine erhöht, steigt die Beanspruchung mit der 3. Achse. Wird dagegen die 3. Achse genutzt, um das Gesamtgewicht von 2 Achsen besser abzustützen und gleichzeitig der Reifeninnendruck reduziert, können bodenschonende Effekte erzielt werden. Um die Bodenbeanspruchung in ihrer Wirkung umfassend beschreiben zu können, sind deshalb unbedingt

die Überrollhäufigkeit für alle Arbeitsgänge einer Kultur sowie der Anteil der befahrenen Fläche anzugeben (siehe S. 45).

Um den Bodendruck zu mindern, wurde in jüngerer Zeit beim Trend steigender Radlasten die Absenkung des Kontaktflächendruckes als Strategie empfohlen, Stichworte waren Breitreifen, Bandlaufwerke, "low ground pressure"-Systeme. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass bei gleicher Radlast eine Absenkung des Kontaktflächendruckes weniger Auswirkung auf die Tiefenwirkung als vielmehr auf die Minderung des Bodendruckes in der Ackerkrume hat. Unterbodenverdichtungen sind deshalb bei zunehmender Radlast nur mit überproportionaler Reduzierung des Kontaktflächendruckes vorzubeugen. Dies gilt immer bei relativ gleichmäßig ausgebildeten Feuchtezonen über die Horizonte. Ist dagegen die Krume trocken und der Unterboden feucht, müssen zunehmende Radlasten bei konstantem Kontaktflächendruck nicht generell eine zusätzliche Gefährdung des Unterbodens bewirken. Somit liegt eine technische Lösung für eine wirksame Vorsorge gegenüber Bodenverdichtungen in einer Anpassung der Radlast in Kombination mit Reifenbreite und Reifeninnendruck sowie der Reduzierung der Überrollhäufigkeit.

#### Verformung der Bodenstruktur – Bodenverdichtung

Überschreitet der Lasteintrag die Eigenstabilität des Bodens, kommt es zu Veränderungen der Bodenstruktur. Primäre Bodenpartikel werden im Bodenvolumen umgelagert, um die aufgebrachte Last durch Erhöhung der Kontaktpunkte abstützen zu können. Dies ist auch eine Erklärung der höheren Tragfähigkeit des Oberbodens bei nichtwendender Bodenbearbeitung (Konservierende Bodenbearbeitung, Direktsaat) gegenüber konventioneller Bearbeitung mit Pflug.

In Abb. 3.7, S. 34 wird mit Hilfe der Computertomographie die Morphologie einer Bodensäule von 0 bis 35 cm Tiefe dargestellt: links unbefahren, rechts befahren:

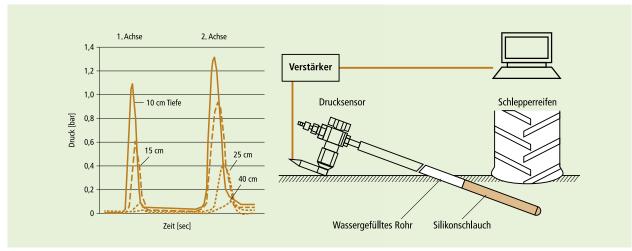


Abb. 3.6: Mehrfache Überrollung der gleichen Spur erhöht den Bodendruck, gemessen mit Schlauchdrucksonden (WEIßBACH, 2003)

Diese Durchporung wird insbesondere durch Regenwürmer geleistet, deren Häufigkeit bei nichtwendender gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung erheblich erhöht ist (VAN CAPELLE ET AL., 2012a und b). In schluffigen und lehmigen Böden ist dieser Unterschied besonders ausgeprägt (VAN CAPELLE ET AL., 2012). Reagiert das Gefüge elastisch, ist die Bodenverformung reversibel, plastische Verformung hat dagegen eine bleibende Gefügeveränderung zur Folge. Für den Bodengefügeschutz wäre es deshalb sehr hilfreich, bereits während der Arbeitserledigung auf dem Feld abschätzen zu können, ob die Überfahrt irreversible Verdichtungen insbesondere im Unterboden verursacht.

Neue Entwicklungen in der Messtechnik erlauben es, die Setzung des Bodens als Ausdruck der Verdichtung im Boden während der Befahrung ohne Störung der Struktur zu messen und anzuzeigen (siehe auch S. 49 ff.).

Mit Hilfe einer hydrostatischen Niveaumessung (NOLTING ET AL., 2006) wird die Setzung des Bodens durch Befahrung

mit einer Genauigkeit von 0,1 mm angezeigt. Diese Messmethode berücksichtigt alle aktuellen Boden- und Fahrzeugparameter und erlaubt quantitative Aussagen zur tatsächlichen Verdichtung (s. Abb. 3.5, S. 32). Die Abb. 3.8 zeigt die elastische und plastische Verformung bei unterschiedlichem Reifeninnendruck eines Traktorreifens bei 4t Radlast.

Werden 4t Radlast mit geringem Reifeninnendruck von 0,8 bar abgestützt (unten), liegt auch nach der 4. Überrollung eine elastische Verformung vor. Bei einem hohen Luftdruck von 2,1 bar (oben) verbleiben 2 mm bleibende Setzung und zeigen eine plastische Verformung an.

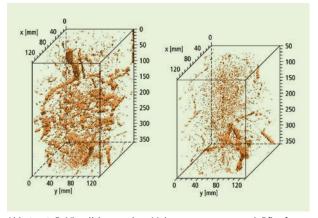


Abb. 3.7: 3-D-Visualisierung eines Makroporensystems nach Pflugfurche ohne Druckbelastung (links) und nach einer Druckbelastung mit 250 kPa (rechts: Bodensäule 50 mm niedriger) (JÉGOU ET AL., 2001)

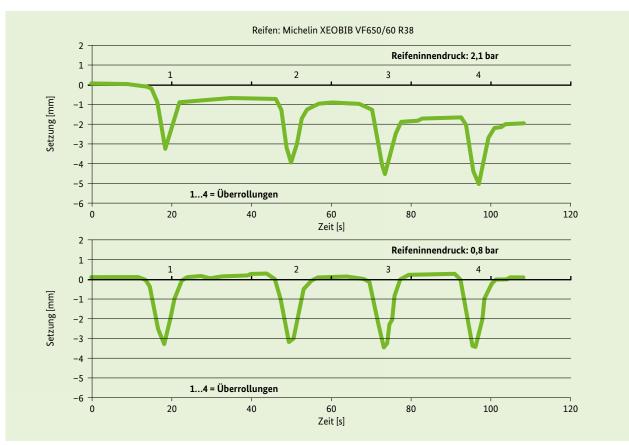


Abb. 3.8: Bodensetzung in 40 cm Tiefe nach 4-facher Überrollung mit unterschiedlichem Reifeninnendruck (NOLTING ET AL., 2006)

#### Wirkungen

Die Wirkung einer Verdichtung kann sehr unterschiedlich sein und ist durchaus nicht nur mit aufwendigen bodenphysikalischen Messmethoden nachweisbar. Für einen erfahrenen Ackerbauern sind die Folgen einer Verdichtung i.d.R. bereits ohne großen messtechnischen Aufwand zu erkennen. Der beste Indikator für ungünstige Gefügeeigenschaften in der Krume oder im Unterboden ist die Kulturpflanze. Sie reagiert schnell, empfindlich, zuverlässig und für ein geschultes Auge leicht erkennbar auf eine Verdichtung und

deren Verbreitung innerhalb eines Schlages. Weiterhin sind Wasseransammlungen auf der Bodenoberfläche, Verschlämmungen oder Bodenabtrag in Fahrspuren erste und vor allem schlüssige Indizien. In der folgenden Übersicht werden die verschiedenen Indikatoren für Verdichtung, typische Schadbilder, typische Merkmale und mögliche Wirkung auf die verschiedenen Bodenfunktionen beschrieben.

Die Zusammenstellung zeigt, dass der Praktiker mit einer Reihe von Indikatoren wichtige Hinweise auf Verdichtungen erhält, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen können (Schadverdichtungen). Vor allem die Vegetation ist ein

Tab. 3.3: Indikatoren, Merkmale und Wirkungen einer Verdichtung

Indikator	Schadbild/Merkmal	Wirkung	
Vegetation	ungleicher Aufwuchs und verzögerte Entwicklung bei gleicher Bewirtschaftung und gleicher Gründigkeit/Wurzelraum innerhalb eines Schlages oder im Vergleich zu ähnlichen Kulturen im näheren Umfeld auf gleichen Standorten	Ertragsunsicherheit bzwminderung	
	Chlorose bei gleichem Düngungsniveau	Ertragsunsicherheit bzwminderung und gasförmige Verluste an Nährstoffen	
	lückiger Bestand mit kürzeren Pflanzen	Ertragsunsicherheit bzwminderung	
	schnellere Abreife und geringeres TKG	Ertragsunsicherheit bzwminderung	
Bodenoberfläche	Verschlämmung	Beeinträchtigung des Gas- und Wasserhaushaltes, der Bestandesentwicklung und erhöhter Boden- abtrag; Verlust an Nährstoffen; Beeinträchtigung von Fließgewässern	
	Spurrillen: zerfahrene Bodenoberfläche (Spuren kreuz/quer)	Bodenabtrag	
	"tiefe" Fahrspuren und die zugehörigen Aufwölbungen am Rand der Fahrspuren	hoher Aufwand bei der Bodenbearbeitung	
	Wasserstau an der Oberfläche	Beeinträchtigung des Gas- und Wasserhaushaltes	
	Erosionsrinnen	Beeinträchtigung des Gas- und Wasserhaushaltes, der Bestandesentwicklung und erhöhter Boden- abtrag; Verlust an Nährstoffen; Beeinträchtigung von Fließgewässern	
	nur vereinzelte Losungshaufen von Regenwürmern erkennbar	schwache Aktivität der Regenwürmer verbunden mit geringer Umsatzleistung an Vegetationsresten	
	unvollständig eingearbeitete bzw. unverrottete Vegetationsreste	Sauerstoffmangel für Pflanzenwurzeln und aerobe Bodenorganismen	
Oberboden bzw. Ackerkrume	grobschollig abgelegte Krume; klutige Aggregate, die nur mit großem Kraftaufwand zu zerlegen sind	erhöhter Kraft- und Arbeitsaufwand für die Saatbetterstellung, ungleichmäßiger Pflanzenauf- wuchs, Nährstoffverluste infolge unzureichender Aggregatdurchwurzelung	
	Strohmatratzen	Beeinträchtigung der Durchwurzelung und der Bodenorganismen	
	Bereiche, die gräulich-blau gefärbt sind und unangenehm riechen	Sauerstoffmangel für Pflanzenwurzeln und aerobe Bodenorganismen	
	nur vereinzelte Regenwurmgänge	eingeschränktes Wasseraufnahmevermögen, erhöhter Oberflächenabfluss, Sauerstoffmangel	
	Wurzeln vor allem auf den Aggregatoberflächen und nicht in den Aggregaten; Wurzelverzwei- gungen an der Grenze zum Unterboden	unzureichende Wasser- und Nährstoffaufnahme	

Unterboden

Aggregate, die nur mit großem Kraftaufwand zu

Wurzeln ungleichmäßig und nicht im gesamten

Bodenaggregate scharfkantig, plattig und eng

nur vereinzelte Regenwurmgänge und nur

wenig Humuseintrag durch Regenwürmer

deutlicher Indikator. Für den Landwirt lassen sich Beeinträchtigungen in der Vegetationsentwicklung und/oder im Ertrag und damit an den Bodenfunktionen nachweisen. Bodenphysikalische Messwerte liefern oft zusätzlich den wissenschaftlichen Beleg. Deshalb sollte der Praktiker im Rahmen der Vorsorge (Gute fachliche Praxis) das Hauptaugenmerk regelmäßig auf die Vegetation, die Bodenoberfläche (Wasserstau, Losungshaufen von Regenwürmern), die Durchwurzelung, die Zersetzungsvorgänge der organischen Reste im Oberboden und die biologische Vielfalt im Boden sowie das Wurzelbild richten. Diese Vorgehensweise liefert schnell und plausibel nachvollziehbare Einschätzungen.

zerlegen sind

geschlossen

Die flächenrepräsentative Messung der bodenphysikalischen Kennwerte wie Rohdichte, Porengrößenverteilung, Wasserund Luftdurchlässigkeit, ungesättigte Wasserleitfähigkeit, Infiltrationsvermögen und Eindringwiderstand sind sehr zeit- und arbeitsaufwendig und im Prinzip nur bei Wassergehalten, die der Sättigung im Frühjahr (Feldkapazität) entsprechen, durchführbar.

Die Interpretation der Daten im Hinblick auf Schädigung und Beeinträchtigung der Bodenfunktionen erfordert zudem umfangreichen bodenkundlichen Sachverstand und vor allem Erfahrung in der Beurteilung der kausalen Zusammenhänge zwischen Boden, Durchwurzelung und Ertrag.

#### Bodenverdichtungen erkennen und beurteilen

stoffen bei der Bearbeitung

Wurzelausbreitung

Wurzeln, erhöhter Bedarf an Zugkraft und Kraft-

gehemmte Austauschprozesse im Oberboden

und ungünstige Bedingungen für die vertikale

Flächen, auf denen Beeinträchtigungen der Vegetationsentwicklung zu beobachten sind, sollte man ausweisen, markieren und nach der Ernte eine Feldgefügeansprache durchführen.

Mit der Gefügeansprache lässt sich leicht die Tiefenlage und Ausprägung einer Verdichtung nachweisen. Für die Ansprache gibt es seitens der Agrarverwaltung und aus der angewandten Bodenkunde Leitfäden, die eine Interpretation möglicher Schadbilder erleichtern.

Zu erwähnen sind hier insbesondere:

» DIEZ (1991) entwickelte ein Schema zur Gefügebeurteilung im Feld, das die "Görbingsche Spatendiagnose" erweiterte. Gliederungskriterien sind die Gefügeformen (Einzelkorn-, Kohärent-, Krümel-, Bröckel- und Polyedergefüge) und sonstige Merkmale (Wurzeln, Farbe, Geruch, Ernterückstände, Röhren/Klüfte, Übergänge). Die Bewertung orientiert sich an der Eignung für das Pflanzenwachstum und umfasst 5 Stufen (1 = sehr günstig bis 5 = sehr ungünstig). Für bodenkundlich geschultes Personal eine geeignete Methode die Bodenstruktur im Feld zu analysieren. Im Sonderheft "Unser Boden" von top agrar für die Praxis aufbereitet (TOP AGRAR, 2010).

- » WEYER & BÖDDINGHAUSEN (2009) haben einen Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Schadverdichtungen im Feld entwickelt, der die Spatendiagnose mit einer Profilansprache koppelt. Jedem der insgesamt 11 anzusprechenden Bodenmerkmale (1. Bodenoberfläche, 2. Eindringwiderstand des Bodens, 3. Wurzelwachstum, 4. Bodenaufbau, 5. Rottezustand, 6. Bodenfarbe, 7. Bodengeruch, 8. Bodengefüge, 9. Verfestigungsgrad der Aggregate, 10. Lagerungsdichte, 11. Makroporenanteil) werden anhand von farbigen Abbildungen und des Ausprägungsgrades Zustandsstufen von 1 bis 5 zugewiesen. Stufe 1 beschreibt den besten und Stufe 5 den schlechtesten Zustand – multipliziert mit einem Faktor und aufsummiert, errechnet sich eine Gesamtpunktzahl, die verglichen mit einer Bewertungsskala den ermittelten Verdichtungsstatus des Bodens angibt.
- BRUNOTTE ET AL. (2011c) führten Mosaiksteine aus einer Spatendiagnose und einer ausführlich beschriebenen Profilansprache zu einer feldtauglichen Gefügebeurteilung zusammen. Ein wasserfestes Klemmbrett in DIN A3 beinhaltet auf der Rückseite die Vorgehensweise und drei Beispiele (Sand, Lehm, Ton) und auf der Vorderseite die sechs Parameter zur Bewertung des Gefüges: Struktur der Oberfläche, Durchwurzelung, Makroporen, Gefüge und Verfestigung, organische Reststoffe und Farbe und Geruch. Anhand von farbigen Gefügebildern kann der Landwirt bei der Bewertung zwischen 5 Stufen wählen. Durch Addition kommt er zur Gesamtbeurteilung mit der Aussage, ob Vorsorge zum Bodenschutz und optimale Wachstumsbedingungen gegeben sind. Die

- schriftliche Beurteilung kann als Dokumentation in der Ackerschlagkartei abgeheftet werden.
- HARRACH ET AL. (2012) beschreiben in ihrer Methode zur standortgemäßen Bodenbearbeitung das aus Sicht des Bodenschutzes anzustrebende Bodengefüge. Sie zeigen Möglichkeiten der Bodenbewirtschaftung auf, die u.a. für den Bodenschutz immens wichtige Regenwurmaktivität zu fördern und geben Hinweise zur Beurteilung und Kontrolle des anzustrebenden Bodengefüges. Die Broschüre ergänzt die Ausführungen von Harrach (2011) zu den Grundzügen eines Leitbildes "Anzustrebendes Bodengefüge", an dem eine Vielzahl von Praktikern und Bodenkundlern mitgearbeitet haben (Abb. 3.1, S. 25).

Aber auch auf Feldern ohne Vegetation lassen sich durch die Beurteilung der Bodenoberfläche, z.B. nach starken Niederschlägen, Flächen hinsichtlich Verschlämmung, Bodenabtrag und Wasserstau ausweisen, die im Vergleich zu anderen, verdichtet sind.

Häufig handelt es sich um dieselben Flächen, auf denen die Vegetationsentwicklung und Ernteergebnisse Beeinträchtigungen zeigen. Die Feldgefügeansprache, ergänzt durch Beobachtungen zum Wachstum und Ertrag der Kulturpflanzen, lassen am ehesten eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen erkennen und das Ausmaß und die Gestaltung von Vorsorgemaßnahmen zur Guten fachlichen Praxis ableiten.

### Konzept für bodenschonendes Befahren

Aus Literaturanalysen (SOMMER, 1974; DÜRR ET AL., 1995; KTBL, 1998), wissenschaftlichen Belastungsversuchen und Erfahrungen aus der Praxis und Beratung wurde schon 1998 das "Konzept für bodenschonendes Befahren" entwickelt (SOMMER, 1998a; SOMMER & BRUNOTTE, 2003). Die Weiterentwicklung dieses Konzeptes im Bereich Bodenwissenschaften und Agrartechnologie ermöglicht heute eine Anpassung der Fahrzeugparameter an die aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit der Böden.

Berücksichtigt werden bodenfunktionelle, fahrzeugtechnische und arbeitswirtschaftliche Aspekte zur Vorsorge bei der Bodenschonung.

In Abb. 3.9 (S. 38) sind für die Entstehung von Bodenverdichtungen die wichtigsten Einflussfaktoren, wie bodenbürtige Standortbedingungen, aktuelle Niederschläge, Bodenbearbeitungsintensität und eingesetzte Landtechnik aufgeführt

und für das Konzept "Bodenschonendes Befahren" die maßgeblichen Strategien, wie

- 1. Acker- und pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten,
- 2. Weiterentwicklung von Arbeitsverfahren und
- 3. Technische Möglichkeiten

aufgelistet. Jede Strategie beinhaltet eine Vielzahl von Lösungsansätzen, von denen einige im Grundsatz in diesem Kapitel abgehandelt werden. Detaillierte Handlungsanweisungen werden dann ab S. 51 unter dem Stichwort "Maßnahmenkatalog – 15 Fallbeispiele für Gute fachliche Praxis nach dem Konzept für bodenschonendes Befahren" entwickelt mit dem Ziel, Bodenverdichtungen zu vermindern (die genannten Beispiele sind lediglich eine Auswahl). Dabei stehen die Erhaltung und die Verbesserung der Bodenfunktionen und insgesamt der Bodenfruchtbarkeit im Vordergrund.

Abb. 3.9: Das Konzept "Bodenschonendes Befahren" – Einflussfaktoren, Strategien und Lösungsansätze (SOMMER, 1998b, geändert n. BRUNOTTE, 2008)

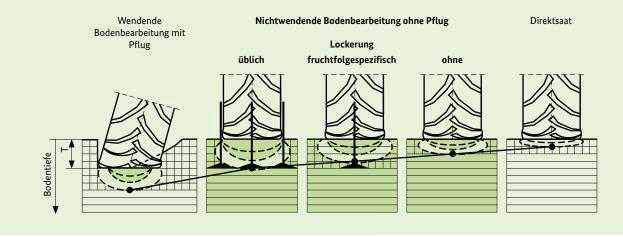


Abb. 3.10: Tiefenwirkung von Bodendruck bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren (SOMMER & BRUNOTTE, 2003)

#### Acker- und pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten

#### Erhalt und Steigerung der mechanischen Belastbarkeit des Bodens/Verbesserung der Tragfähigkeit:

Eine wichtige Strategie ist, die Belastbarkeit/Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen, also die Fähigkeit des Bodens zu stärken, höhere Lasten zu tragen. Die ersten Anstrengungen reichen bis zu den Anfängen konservierender Bodenbearbeitung in Deutschland Anfang der 80er Jahre zurück. Der Boden wird bearbeitet, um günstige physikalische Bedingungen für das Pflanzenwachstum zu schaffen und dabei ggf. das Bodengefüge nach Verdichtungen zu regenerieren. Der Pflug schafft ein eher überlockertes Gefüge, das wiederum verdichtungsempfindlich ist (SOMMER, 1998b). Der grundsätzliche Ansatz zur Verminderung von Bodenverdichtungen beruht auf der Erhöhung der Bodentragfähigkeit (SOMMER, 1985; TEBRÜGGE, 1988; SOMMER & HARTGE, 1991), indem mit nichtwendenden Lockerungsgeräten eine schonende Bodenlockerung erfolgt (GRUBER, 1993; SEMMEL, 1993). Durch die geringere Überlockerung herrscht eine dichtere Bodenlagerung vor, die Bodenpartikel verfügen über eine größere Anzahl Berührungspunkte, die die aufgetragenen Spannungen besser ableiten können.

Für die Bodenbearbeitungsverfahren kann daraus gefolgert werden: die Bodentragfähigkeit steigt von der Bodenbearbeitung mit Pflug => Konservierende Bodenbearbeitung mit krumentiefer Lockerung => Konservierende Bodenbearbeitung ohne Lockerung (max. 10 cm) => Direktsaat ohne Bodenbearbeitung (Abb. 3.10).

Zusätzlich kann die Bodentragfähigkeit insbesondere der Tonminerale durch Abtrocknung gesteigert werden, da das Wasser als Gleitfilm fehlt, die Partikel gegeneinander zu verschieben. Trockene Bodenzustände leisten einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Bodentragfähigkeit. Feldarbeitstage, Druschtage bzw. Befahrbarkeitstage sind deshalb bei Investitionen von Maschinen hinsichtlich Kapazitätsauslastung unbedingt mit zu berücksichtigen.

Die Erhöhung der Bodentragfähigkeit wird anhand einiger wissenschaftlicher Ergebnisse belegt: Veränderungen im Bodengefüge nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung: Konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat führen gegenüber Pflugbearbeitung zu einer höheren Bodendichte. Diese ist im Sinne der Tragfähigkeit nur zu verantworten, wenn die unbearbeiteten Horizonte durchlässig sind für Luft, Wasser, Regenwürmer und Wurzeln. Beim Pflug können die Bodenfunktionen in der Schlepperradsohle ggf. beeinträchtigt sein (LK 5,9 Vol.-%), verursacht durch vertikale Spannungen und Scherwirkungen (Schlupf) des Furchenrades (Tab. 3.4, S. 40). Auch ein Flügelschargrubber kann in der Mulchsaat-Variante (10-15 cm) zu ähnlichen Auswirkungen führen, wie es die Werte in 16 bis 22 cm Tiefe anzeigen (LK 6 Vol.-%).

Wird auf Bodenbearbeitung verzichtet (Direktsaat), ist das Bodengefüge insgesamt homogener und die festen Bodenbestandteile in der Krume lagern dichter. Trotzdem ist das Eindringen von Niederschlägen erleichtert, da stabile Krümel und günstige Porengrößenverhältnisse vorherrschen. Das ist insbesondere auf eine höhere biologische Vielfalt im Boden, verbunden mit höheren Regenwurmdichten bei Direktsaat zurückzuführen (VAN CAPELLE ET AL., 2012a). Die erhöhte Anzahl an Regenwürmern ermöglicht eine vermehrte biogene Neubildung an Bodenaggregaten und Makroporen (SCHRADER, 2001). Vor allem vertikale Bioporen mit hoher Kontinuität verbessern die Wasserführung und weisen eine mittlere bis hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit (25 bis 55 cm pro Tag) auf. Durch die Verzahnung mit dem Unterboden gelingt es den Wurzeln, an die Wasser- und Nährstoffvorräte des Unterbodens zu gelangen (BISCHOFF, 2011). Die Erträge der Direktsaat fallen gegenüber den anderen Bodenbearbeitungsvarianten zwar gering ab, deuten aber auf keine Wachstumsstörungen, verursacht durch höhere Dichtlagerung des Bodens, hin.

#### Weitere, die Bodenstruktur stabilisierende Maßnahmen:

Als eine der wichtigsten begleitenden Lösungsansätze ist die Gestaltung der Fruchtfolge zu nennen. Sie dient nicht nur der besseren Auslastung von Maschinen und Geräten, sondern schafft insgesamt größere Zeitfenster, in denen Bodenbearbeitung und Ernte besser an optimale Bodenfeuchtegehalte angepasst werden können. Auch ist durch frühräumende Früchte die Integration von Zwischenfrüchten eher möglich. Hiermit werden nicht nur die Zufuhr organischer Substanz und damit der Humusgehalt gesteigert (siehe S. 11ff.), sondern auch die biologische Vielfalt im Boden sowie die Aktivität der Bodenorganismen erhöht. Die Pflanzenwurzeln, insbesondere von Zwischenfruchtgemischen, lockern den Boden bis in unterschiedliche Tiefe und können beim Vorhandensein von Leguminosen Luftstickstoff im Boden binden, was zu einer Einsparung von mineralischen Düngern in der Folgekultur führt. Weiterhin mindern Zwischenfrüchte die Auswaschung von Nährstoffen, regulieren den Wasserhaushalt und können phytosanitäre Effekte bewirken, wie die biologische Reduzierung von Nematoden. Insgesamt haben Zwischenfrüchte eine bodenaufbauende Wirkung, fördern ökosystemare Dienstleistungen durch Bodenorganismen und führen vor dem Hintergrund, Bodenverdichtungen zu vermeiden, zu einer Stabilisierung der Bodenaggregate.

Der Wechsel von Blatt- und Halmfrüchten erleichtert den Einsatz nichtwendender Bodenbearbeitungsverfahren hinsichtlich technischer und phytosanitärer Anforderungen. Die Aufkalkung des Bodens als strukturverbessernde Maßnahme soll nur der Vollständigkeit halber hier genannt werden.

#### Arbeitsverfahren bei der Bodennutzung

Zusammenlegen von Arbeitsgängen: Um die mechanische Belastung von Flächen umfassend darzustellen, helfen u.a. praktische Untersuchungen im Feld. Neben Radlast und Kontaktflächendruck ist die Überrollhäufigkeit in den Arbeitsketten von großer Bedeutung – die Entwicklung hin zu geringer Überrollhäufigkeit durch Gerätekopplung hat in den 1980er Jahren stattgefunden. Die Überrollhäufigkeit definiert die Überrollung des Bodens achsweise: eine Überfahrt mit einem gezogenen Gülletankwagen mit Tandemachsfahrwerk überrollt den Boden demnach 4-mal.

Beispielhaft wird eine Statuserhebung aus Südniedersachsen (BRUNOTTE ET AL., 2008) herangezogen, die einen Zeithorizont von 50 Jahren berücksichtigt und damit die landtechnische Entwicklung recht gut abbildet.

Während 1952 mehrfach einzelne Arbeitsgänge, bestehend aus Egge und Walze zu einer hohen Überrollhäufigkeit durch den Traktor führten und die Lagerungsdichte in der Krume erhöhten (Abb. 3.11), konnten 1982 durch Zusammenlegen von Arbeitsgängen in Form von Gerätekombinationen (Abb. 3.13, S. 38) in Verbindung mit einer erhöhten Schlagkraft durch größere Arbeitsbreiten eine Reihe von Überrollungen eingespart werden – dies führte zu einer geringeren Lagerungsdichte der Krume. Die Entwicklung von 1982 bis 2002 hat hier keinen weiteren Fortschritt gebracht.

Große Arbeitsbreiten beim Pflügen: bei Betrachtung von Krumenbasis und Unterboden fällt die Krumenbasisverdichtung 1982 auf (Abb. 3.11). Durch Krumenvertiefung und Pflugarbeit mitunter bei hohem Schlupf und feuchten Bodenbedingungen entstand eine deutliche Krumenbasisverdichtung. Die Untersuchungen von 2002 – weitere 20 Jahre später – belegen, dass sich dieser Trend aber nicht fortgesetzt hat.

Tab. 3.4: Bodenphysikalische Parameter bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung von stark tonigem Schluff (Ut4) nach 12 Versuchsjahren (BISCHOFF, 2011)

Bodentiefe [cm]	P 25 Pflug/Packer (25 cm Arbeitstiefe)	M 10-15 Grubber/ Scheibenegge (10 bis 15 cm Arbeitstiefe)	DS Direktsaat	
	TRD [g/cm³]	TRD [g/cm³]	TRD [g/cm³]	
0-6	1,37	1,45	1,51	
16-22	1,4	1,52	1,46	
24-30	1,51	1,45	1,44	
32-38	1,51	1,33	1,46	
42-48	1,47	1,35	1,46	
60-66	1,37	1,3	1,3	
	LK [Vol%]	LK [Vol%]	LK [Vol%]	
0-6	14	10,3	7,4	
16-22	12,2	6	6,7	
24-30	5,9	8,7	6,8	
32-38	6,4	12,8	8,1	
42-48	8,4	12,4	10,8	
60-66	11,3	14,3	15,5	
	kf [cm/Tag]	kf [cm/Tag]	kf [cm/Tag]	
0-6	109	53	25	
16-22	16-22 127		42	
24-30	24-30 40		44	
32-38	47	114	54	
42-48	50	87	39	
60-66	89	78	127	

 $TRD = Trockenrohdichte, LK = Luftkapazit\"{a}t, kf = ges\"{a}ttigte\ Wasserleitf\"{a}higkeit$ 

Als Gründe dafür sind anzuführen:

- eine Zurücknahme der Bearbeitungstiefe aus Kostengründen,
- Fahren auf der Bodenoberfläche durch die Ausdehnung nichtwendender Bodenbearbeitungssysteme (in Deutschland heute mit einem Anteil von 40 bis 50 %),
- Bearbeitung bei akzeptabler Bodenfeuchte durch hohe Schlagkraft,
- technische Detailverbesserungen (Radialreifen mit geringem Innendruck von ca. 1 bar und Schlupfregelung beim Pflügen),
- das Pflügen mit 4- bzw. 5-scharigen Pflügen gegenüber 2- bzw. 3-scharigen bewirkt eine Gewichtsverlagerung zum Landrad und eine Entlastung des Furchenrades (Abb. 3.12, S. 42).

Die Möglichkeiten, Arbeitsgänge zu kombinieren, werden in der "Definition und Einordnung von Verfahren der Bodenbearbeitung und Bestellung" vom KTBL anschaulich dargestellt (Abb. 3.14, S. 43). Da heute Förderprogramme oft an bestimmte Bodenbearbeitungsverfahren geknüpft sind, ist eine klare Definition unbedingt erforderlich.

Die Kombination von Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung und von Saatbettbereitung und Saat bzw. von Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat ist sowohl im System "wendende Bodenbearbeitung" als auch im System nichtwendende Bodenbearbeitung" möglich.

Die nichtwendenden Bearbeitungsverfahren haben sich neuerdings weiter differenziert durch die "partielle Bodenbearbeitung" auch als Streifenbearbeitung bezeichnet. Hier werden die Effekte einer Bodenbearbeitung mit denen der Direktsaat verknüpft, um die Vorteile in Richtung Bodenschutz und Kosteneinsparung zu nutzen. Voraussetzung ist dabei die Nutzung genauester Parallelfahrsysteme im Zentimeterbereich, insbesondere wenn es zu einer Trennung von Bodenbearbeitung/Gülleausbringung und Saat kommt.

Grundsätzlich führt die Kopplung von Arbeitsgängen zu einer Reduzierung der Anzahl Überrollungen und damit zu einer Schonung von Krume und Unterboden. Wichtige Voraussetzungen sind allerdings, dass die Geschwindigkeit der unterschiedlichen Werkzeuge zueinander passt und dass die durch den ersten Geräteteil veränderte Bodenfeuchte an der Oberfläche und im Oberboden ein gutes Arbeitsergebnis des zweiten gekoppelten Werkzeuges, wie z.B. einer Rückverfestigungswalze, zulässt (Abb. 3.14, S. 43).

Die Bodenbearbeitung nimmt nach wie vor eine zentrale Rolle bei der Schonung der Bodenstruktur ein und beeinflusst mit der Lockerungsintensität die Tragfähigkeit des Bodens. Den Verfahren zur Bodenbearbeitung vorgeschaltet sind Maßnahmen, die Anforderungen der Feldhygiene und des Bodenschutzes berücksichtigen. So kann z.B. mit dem Einsatz eines Strohstriegels die Strohquerverteilung des Mähdreschers verbessert bzw. die Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz eingeleitet werden.

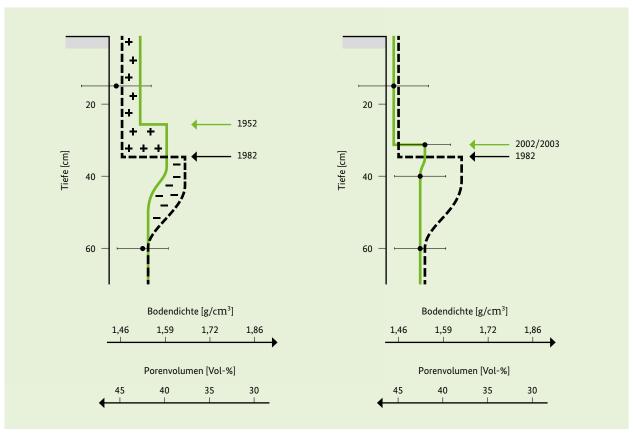


Abb. 3.11: Bodendichte/Porenvolumen von 144 Standorten in Südniedersachsen – tendenzieller Vergleich (RUHM, 1983; n. RUHM zitiert von SOMMER 1985: BRUNOTTE ET AL., 2008)

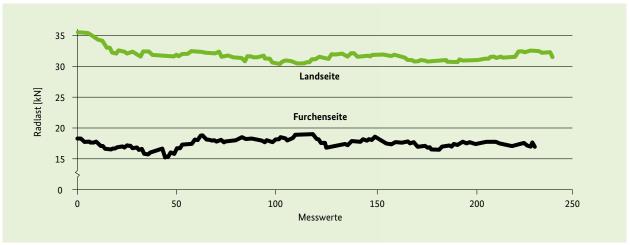


Abb. 3.12: Vergleich der Radlasten Landseite/Furchenseite am Hinterrad eines Traktors beim Pflügen Mittelwerte aus jeweils 6 aufeinanderfolgenden Messfahrten (BRUNOTTE ET AL., 2012)



Abb. 3.13: Messtraktor mit Kurzscheibenegge (Foto: J. Brunotte)

Im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes haben in den letzten Jahren Maßnahmen zur Nachzerkleinerung von Erntereststoffen immer größere Bedeutung bekommen:

Mulchen von Getreidestroh (nach Hochschnitt), Rapsstroh und Maisstoppeln soll die Rottegeschwindigkeit erhöhen, pilzliche Erreger abbauen und Überwinterungsquartiere von Schädlingen zerstören. Damit kann vorsorgend das Gefährdungsrisiko von Fusariosen im Getreide, Phoma bei Raps und Zünsler bzw. Wurzelbohrer bei Mais reduziert werden.

Vor dem Hintergrund der anstehenden Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen ist auch hier eine klare Definition von Maßnahmen zum Mulch und Häckseln wichtig (Abb. 3.15, S. 44). Selbst wenn der Begriff "Mulch" bei der Bodenbearbeitung als "Mulchsaat mit/ohne Lockerung" vorkommt, bezeichnet er zunächst das bei der Zerkleinerung von organischen Stoffen entstehende Produkt. Der Arbeitsschritt "Mulchen" wird zum Kürzen von Aufwuchs/Stoppeln ohne beabsichtigten Bodeneingriff durch Abtrennen, Zerkleinern und flächendeckendes Ablegen von Mulchgut verwendet.

Verfa	hren	Grundbodenbearbeitung (intensive Lockerung)	Saatbettbereitung	Saat	Ablauf der Arbeitsgänge
Wendende Bodenbearbeitung		alaylal			Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
		TO TOTAL			Saatbettbereitung und Saat kombiniert
					Alle Arbeitsgänge kombiniert
					Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
		<b>₹</b> \$			Saatbettbereitung und Saat kombiniert
	cerung				Alle Arbeitsgänge kombiniert
	mit Lockerung				partielle Grundboden- bearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
rbeitung					partielle Grundbodenbe- arbeitung und Saatbett- bereitung kombiniert, Saat getrennt
de Bodenbe			Alle partiellen Arbeitsgänge kombiniert		
Nichtwendende Bodenbearbeitung	ohne Lockerung				Ohne Grundboden- bearbeitung, Saatbettbereitung und Saat getrennt
					Ohne Grundboden- bearbeitung, Saatbettbereitung und Saat kombiniert
					Ohne Grundboden- bearbeitung, partielle Saatbettbereitung und Saat getrennt
				200	Ohne Grundbodenbear- beitung, Saatbettberei- tung und Saat kombi- niert
Discosti	Ducktsaal				Ohne Bodenbearbeitung Bei der Saat werden we- niger als 1/3 der Reihen- weite bearbeitet. Die Bearbeitungstiefe ist die Saatgutablagetiefe.

Abb. 3.14: Verfahrenstechnik und Arbeitsgänge von Bodenbearbeitungs- und Bestellsystemen. Bei partiellen Verfahren werden weniger als 50% der Gesamtfläche bearbeitet. Pflanzenreste bleiben ganzjährig auf der nicht bearbeiteten Bodenoberfläche (KTBL, 2014a)

Abb. 3.15: Definitionen zu Mulchen, Häckseln, Schreddern, Schröpfen und Schlegeln (KTBL, 2014b)

Das Mulchen kommt im Bereich Landschaftspflege, Zwischenfruchtanbau, Stoppeln von Kulturpflanzen, Wiesen und Weiden sowie im Obst- und Weinbau zum Einsatz. Auch hier ist die Kopplung von Arbeitsgängen, wie z.B. Mulcher im Frontanbau und Kurzscheibenegge im Heckanbau, bei der Zerkleinerung von Zwischenfrüchten vor Zuckerrüben oder Mais durchaus praxisüblich.

Bei der Betrachtung des mechanischen Lasteintrages zählen sowohl die direkten Einflussgrößen wie Radlast, Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck, als auch die Verteilung der Spuren über die Fläche in Verbindung mit der Überrollhäufigkeit. Als Indikatoren sind der Spurflächenanteil und die Anzahl Überrollungen zu nennen.

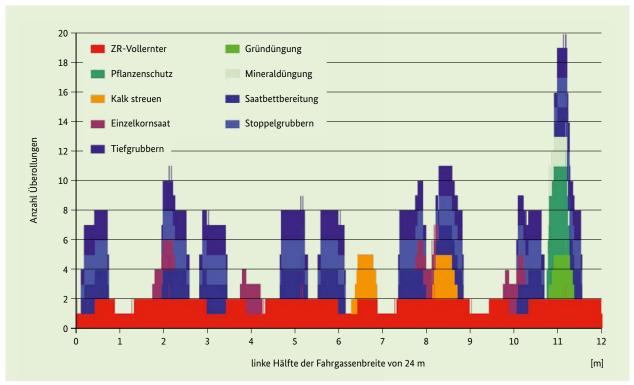


Abb. 3.16: Anzahl Überrollungen und Spurpositionen beim Zuckerrübenanbau (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007)

In Abb. 3.16 sind am Beispiel des Zuckerrübenanbaus über 1 Jahr alle Arbeitsgänge dargestellt. Auffallend ist, dass die gesamte Fläche mindestens 1-mal überrollt ist und dass die Fahrgassen durch Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen mit bis zu 18 Überrollungen deutlich herausstechen.

Bei den Arbeitsverfahren insbesondere der Ernte ist die Abstimmung von Bunkerkapazität und Schlaglänge für die Belastung der Fläche von entscheidender Bedeutung. Dies wird in Abb. 3.17 am Beispiel der Zuckerrübenernte deutlich. Bei den kurzen Schlaglängen 400 und 600 m passt das Erntegut einer Hin- und Rückfahrt in den Bunker.

Wird aufgrund kritischer Bodenzustände beidseitig abgebunkert, um Radlast und Reifeninnendruck reduzieren zu können, entsteht im Vergleich zum einseitigen Entleeren ein höherer Arbeitszeitbedarf - die Flächenleistung sinkt geringfügig. Passt allerdings die gesamte Runde nicht in den Bunker (z. B. bei 800/1.000 m langen Schlägen), tritt zusätzlicher Arbeitszeitbedarf für das nebenherfahrende Transportfahrzeug auf. Hier ist das beidseitige Abbunkern sowohl vom Arbeitszeitbedarf als auch vom Lasteintrag her sehr viel günstiger zu beurteilen. Diese Trends entstehen unabhängig davon, ob der Ackerschlag 20 oder 60 ha groß ist.

Die dauerhafte Trennung von Spur- und Anbaufläche wird als "controlled-traffic-farming" (= CTF) bezeichnet: Neue Ansätze sind etwa Beetkulturen im Gartenbau, Fahrgassensysteme bis hin zu "controlled-farming-systems" in Verbindung mit DGPS-Techniken im Ackerbau und Feinerschließungsnetze in der Forstwirtschaft.

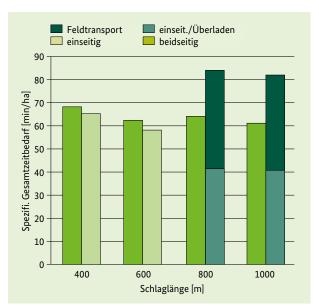


Abb. 3.17: Spezifischer Gesamtzeitbedarf bei der Zuckerrübenernte (sechsreihig, 24t Nutzmasse, Ertrag 60 t/ha) mit ein- und beidseitiger Mietenanlage (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007)

Dem Konzept von CTF liegt zugrunde, dass 80% der Verdichtungsschäden bei der ersten Befahrung auftreten und dass sich die Bodenstruktur je nach Arbeitsbreite auf ca. 2/3 der Fläche ungestört entwickeln kann. Zielparameter sind erhöhte Wasserinfiltration, verminderte Erosionsanfälligkeit, unbehinderter Gasaustausch, verbesserte Feldaufgänge, intensivere Durchwurzelung, stabilere Erträge und geringerer Energiebedarf bei der Bodenbearbeitung (TULLBERG, 2001; CHAMEN, 2006; HOLPP ET AL., 2011; DEMMEL ET AL., 2010).

Abb. 3.18: Kontrollierte Befahrung mit aufeinander abgestimmten Arbeitsbreiten. Bestellkombination 6 m, Pflege 18 m, Mähdrescher 6 m (HOLPP ET AL., 2011)

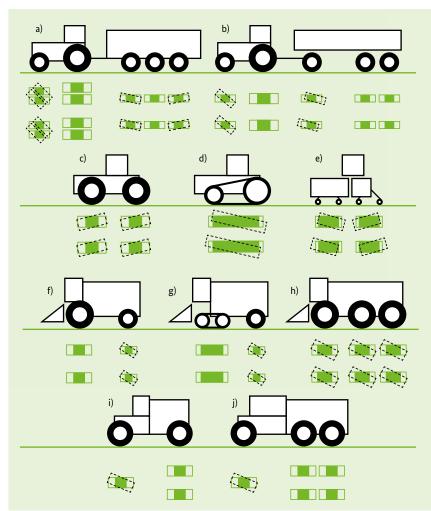
Die größte Verbreitung hat CTF in Australien mit der Integration aller Arbeitsgänge. In Europa befindet sich CTF noch in der Entwicklungsphase und wird von mehreren Institutionen untersucht. Als Arbeitsgänge werden Bestellung, Pflegemaßnahmen und Ernte von Mähdruschfrüchten berücksichtigt (Abb. 3.18).

#### Technische Möglichkeiten zur Minderung von Spannungen im Boden

Haben sich die ersten beiden Strategien mit der Erhaltung/ Verbesserung der Tragfähigkeit und der Anpassung von ganzen Arbeitsketten befasst, geht es bei den technischen Möglichkeiten um Detailverbesserungen einzelner Fahrzeugparameter, damit eine **Anpassung an die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden** erfolgen kann. Wichtiger Bestandteil ist dabei die Planung des Maschineneinsatzes bei anstehenden Investitionen und des Ernteeinsatzes sowie die Erfolgskontrolle auf dem Acker.

Jüngere Fahrwerksentwicklungen wie Gummibandlaufwerke, Dreirad- und Fünfradfahrzeuge und Fahrwerke mit Knickgelenk helfen durch kontinuierlich spurversetztes Fahren, die Gesamtlast auf einer breiten Fläche abzustützen und damit die Überrollhäufigkeit zu mindern. Bandlaufwerke sind integraler Bestandteil des Fahrzeugkonzeptes und werden vielfach in Kombination mit Reifen-Fahrwerken eingesetzt.

Abb. 3.19 zeigt für Traktoren, selbstfahrende Arbeitsmaschinen sowie für gezogene Geräte und Transportanhänger



- a) Traktor mit Reifen-Fahrwerk,
   Doppelbereifung an den Traktorachsen,
   Anhänger in Aufsattel-Bauform mit drei
   Achsen, zwei lenkbar
- b) Traktor mit Reifen-Fahrwerk, Gelenkdeichsel- Anhänger und drei Achsen
- c) Traktor mit gleich großen Reifen, zwei Lenkachsen, versetzte Fahrspuren möglich
- d) Traktor mit zwei Band-Fahrwerken
- e) Traktor mit vier Band-Fahrwerken und Knicklenkung
- f) selbstfahrende Arbeitsmaschine mit Reifen-Fahrwerk, Lenkachse hinten
- g) selbstfahrende Arbeitsmaschine mit Band-Fahrwerk an der Vorderachse
- h) selbstfahrende Arbeitsmaschine mit Reifen-Fahrwerk, drei Lenkachsen, versetzte Fahrspur möglich
- i) Trägerfahrzeug mit Drei-Rad-Reifenfahrwerk
- j) Trägerfahrzeug mit Fünf-Rad-Reifenfahrwerk

Abb. 3.19: Reifen- und Band-Fahrwerke an landwirtschaftlichen Fahrzeugen (nach FRERICHS, 2004; VDI 2007, geändert)

mögliche Fahrzeug-Fahrwerk-Kombinationen (VDI, 2007). Bei der Bodenbearbeitung und Bestandesführung kann durch den Übergang von Anbau- hin zu Aufsattelgeräten die Traktorhinterachse besonders am Vorgewende entlastet werden (BRUNOTTE ET AL., 2011b).

Der Verringerung des Kontaktflächendruckes (in der Berührungsfläche Reifen/Boden) durch Zwillingsräder, Breitreifen und Gummibandlaufwerke wurde in der Vergangenheit große Aufmerksamkeit geschenkt. Bei der Reifenentwicklung lösten Radialreifen die Diagonalreifen ab (Abb. 3.20). Die flexible Flanke der Radialreifen kann stark einfedern, sodass aufgrund verlängerter Kontaktflächenzonen der Kontaktflächendruck sinkt, Triebkraftbeiwert und Fahrkomfort des Reifens steigen. Die Vergrößerung der Aufstandsfläche hat bei gleicher Radlast die Verringerung des Kontaktflächendruckes zur Folge. Dies führt zu geringem Bodendruck insbesondere in der Ackerkrume. Großvolumige Reifen können heute bei einem Kontaktflächendruck von 1 bar (= 100 kPa) Radlasten bis 10t abstützen.

Für die Anpassung des Reifeninnendruckes an veränderte Radlasten stehen heute Hand-, halbautomatische und vollautomatische Reifeninnendruck-Verstellanlagen zur Verfügung. Insbesondere im Bereich der Gülleausbringtechnik werden Verstellanlagen an den Gülletankwagen, die sowohl Straßen- als auch Feldtransport übernehmen, eingesetzt. Dabei stehen Bodenschonung und Haltbarkeit der Reifen im Vordergrund.

Allerdings kann bis heute ohne Kenntnis der dynamischen Radlast das Potenzial der Reifen für eine maximale Bodenschonung nicht ausgeschöpft werden. Am Ende des Kapitels (S. 49) wird eine technische Weiterentwicklung beschrieben, die den Reifeninnendruck an die dynamische Radlast anpasst und ihn automatisch regelt. Prototypen befinden sich im praktischen Einsatz. Um Maschinen und Geräte grundsätzlich an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden anpassen zu können, ist ein Planungsinstrument für Maschineninvestitionen und -einsatz erforderlich, gefolgt von einer In-situ-Kontrolle auf dem Acker. Das Planungsinstrument ist eine durch ein Expertensystem gestützte Entscheidungsmatrix, in die eine Vielzahl von Ergebnissen wissenschaftlicher Belastungsversuche eingeflossen ist. Ein praxistaugliches Multisensorsystem hilft dann, die ausgewählten Maßnahmen in ihrer Effizienz zu überprüfen.

Bei der **Nutzung technischer Möglichkeiten** geht es nicht allein um die Vorstellung und Beschreibung technischer Bauteile und Fahrwerke, sondern gerade auch um Einsatz und Koordinierung von Techniken für einen vorsorgenden Bodenschutz. D.h. wie kann der Maschineneinsatz standortabhängig geplant und durchgeführt werden, bezogen auf die Investition und den praktischen saisonalen Einsatz.

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. In niederschlagsreichen Regionen stehen weniger Befahrbarkeitstage zur Verfügung, sodass die Auslastungsgrade geringer anzusetzen sind und für einen rentablen Einsatz nur die Nutzungsdauer über die Jahre erhöht werden kann. Es helfen grundsätzlich zwei Instrumente, Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit anzupassen. Sie können unabhängig vom Standort und von der eingesetzten Technik genutzt werden:

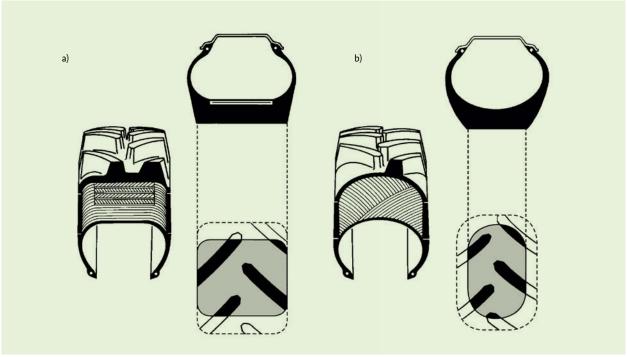


Abb. 3.20: Aufbau und Kontaktfläche eines Radialreifens und eines Diagonalreifens (aus DLG-Merkblatt 356)

- Entscheidungsmatrix für den standortangepassten Maschineneinsatz als Planungsinstrument,
- Instrument der Erfolgskontrolle Multisensorsystem als zukünftige Technologie.

Die Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit zur "Anpassung des Maschineneinsatzes an die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit" ist abgeleitet aus regionalen Statuserhebungen und einer Reihe von praxisorientierten Belastungsversuchen (BRANDHUBER ET AL., 2008; BRU-NOTTE, 2007; ISENSEE & SCHWARK, 2006; KOCH ET AL., 2002; SOMMER & BRUNOTTE, 2003; VORDERBRÜGGE & BRUNOTTE, 2011; weiterführende Literatur siehe Literaturverzeichnis, S. 72). Sie wurde in ein Expertensystem zur Bodenschonung zusammengeführt (LORENZ ET AL., 2016). Zur Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen wurde ein Schema von Brunotte et al., (2015, verändert nach Chamen et al., 2003) verwendet und angepasst (vgl. Abb. 3.21). CHAMEN ET AL. (2003) wiesen damit auf EU-Ebene auf die Notwendigkeit einer "Anpassung von Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden" hin.

Auf der X-Achse ist die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit abgetragen, die in erster Linie die Bodenfeuchte und Bodenart berücksichtigt. Hierbei werden die Bodenarten sowohl hinsichtlich ihres Ton- und Feinschluffgehaltes, als auch ihrer Wasserretentionsfunktionen klassifiziert (LORENZ ET AL., 2016; AG BODEN, 2005; PETELKAU ET AL., 2000). Dadurch wird es möglich die Einflüsse des Tongehaltes und des unterschiedlichen Verhaltens der Böden bei unterschiedlichen Feuchtgehalten zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit mit zu berücksichtigen. In Abhängigkeit der Bodenart und Bodenfeuchte lässt sich so taggenau die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens bestimmen und einer der 5 Verdichtungsempfindlichkeitsklassen zuordnen (vgl. Abb. 3.21)

Auf der Y-Achse wird das Ausmaß der mechanischen Belastung anhand von 6 Indikatoren bewertet, die es ermöglichen die Maschinen nach ihrem Lasteintrag von "sehr hoch - sehr gering" einzustufen (LORENZ ET AL., 2016). Die Vorsorge zum Bodenschutz folgt dem Grundsatz: "Die Maschinenparameter sind nach der Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes auszurichten!". Generell wird durch die Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit ein Vergleich zwischen der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens mit der mechanischen Belastung durch die Maschine oder Verfahrenskette vorgenommen. Übersteigt die mechanische Belastung (Y-Achse) die Belastbarkeit des Bodens (X-Achse), so kommt es zu Bodenverdichtungen. Zur Abgrenzung des Risikos einer schädlichen Bodenverdichtung dient die diagonale Linie in Abb. 3.21. Bei hohen Verdichtungsempfindlichkeiten des Bodens darf nur mit sehr geringen mechanischen Belastungen befahren werden. Bei sehr geringen Verdichtungsempfindlichkeiten kann hingegen auch mit hohen mechanischen Belastungen gefahren werden. Bei sehr hohen Verdichtungsempfindlichkeiten des Bodens oder sehr hohen mechanischen Belastungen ist jedoch auch hier Vorsicht geboten bzw. sollte auf eine Befahrung verzichtet werden. Eine konkrete Beurteilung ganzer Mechanisierungsketten (Mähdrusch, Silomais häckseln, Zuckerrüben roden, Kartoffeln roden, Ausbringung organischer Nährstoffe) erfolgt in den Fallbeispielen zur Guten fachlichen Praxis ab Seite 51.

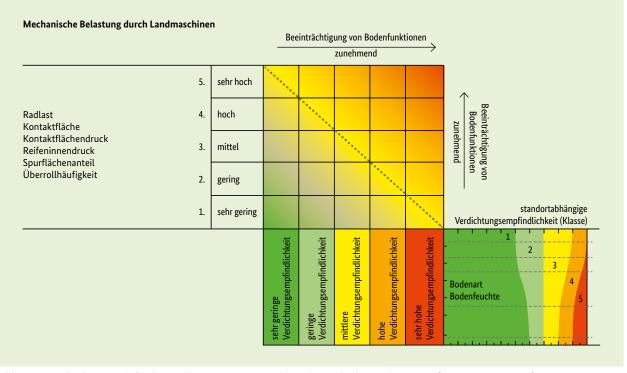


Abb. 3.21: Entscheidungsmatrix für den standortangepassten Maschineneinsatz als Planungsinstrument (LORENZ ET AL., 2016)

#### Ausblick und zukünftige Entwicklung

Die Entscheidungsmatrix ermöglicht eine grobe Planung des Maschineneinsatzes in Abhängigkeit von der mittleren Niederschlagsverteilung über das Jahr. Der aktuelle Bodenzustand zum Zeitpunkt des Befahrens kann allerdings nur vor Ort berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen der Befahrung sichtbar zu machen, kann ein Multisensorsystem (Abb. 3.23, S. 50) hilfreich sein. Die Nutzung von Sensorik stellt bei dieser Problematik einen Ausblick zukünftiger landtechnischer Entwicklungen dar. Zurzeit existiert ein Prototyp, der in einer Reihe von Landmaschinen wissenschaftlichen Untersuchungen dient. Der nächste Schritt wäre eine industrielle Produktion.

Um dynamische Befahrungseffekte abzubilden, sind In-situ-Messungen erforderlich. Bekannte etablierte Messungen zum Bodendruck (starre und flexible Sonden => BOLLING, 1987; STAHL ET AL., 2005; LEBERT, 2010) geben einen indirekten Hinweis auf die im Boden unter Last auftretenden Verformungsprozesse. Durch den Bodendruck induzierte Setzungen werden dabei nicht erfasst. 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).

Da der Aufwand zur Errichtung derartiger Messstellen sehr hoch war, haben NOLTING ET AL. (2006) eine Schlauchwaage modifiziert und ein hydrostatisches Niveau-Messgerät

entwickelt, das den 1. Baustein des Multisensorsystems darstellt (Abb. 3.23, S. 50). Die Setzungen im Boden können als Höhenunterschiede mit einer Auflösung von 0,1 mm gemessen werden (siehe Seiten 32, 34, 50, 54).

Durch die Messung zur Bodensetzung allein kann noch keine direkte Aussage über den aktuellen Zustand der Funktionalität des Gefüges getroffen werden, aber es ist eine Prognose möglich, ob durch die Befahrung mit einer Verschlechterung der Ausgangssituation zu rechnen ist.

Die nachgeschaltete Feldgefügeansprache (s. S. 36), ggf. ergänzt durch bodenphysikalische Untersuchungen, gibt Auskunft, ob bereits eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen im Sinne des BBodSchG § 17 vorlag bzw., ob es durch die Befahrung zu einer Schädigung gekommen ist (siehe Fallbeispiel "Veränderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit bei der Silomaisernte", Abb. 3.31, S. 57).

Den 2. Baustein des Multisensorsystems stellt ein Ultraschallsensor unter der Maschinenachse dar (Abb. 3.23, S. 50), der eine Online-Messung der Spurtiefe ermöglicht. Eine Verknüpfung mit der Setzung erfolgt, indem die vertikale Bodenbewegung nach unten mit Hilfe der Setzungsmessung erfasst wird. Zeigt diese eine bleibende Bodensetzung (= plastische Verformung) an, müssen Fahrzeugparameter an den kritischen Bodenzustand angepasst werden. Hierzu ist ein 2. Ultraschallsensor in der Felge (= 3. Baustein des Multisensorsystems) erforderlich, weil er die aktuelle Reifen-Einfederung misst, die eng korreliert mit der dynamischen Radlast.

Für den Reifenhersteller existiert intern ein Maximalwert, bei dem es zu keiner Schädigung des Reifens kommt und



Abb. 3.22: Ultraschallsensor in der Felge (Foto: Ortmeier, TI)

gleichzeitig eine maximale Kontaktfläche realisiert wird. Aus dieser maximalen Einfederung werden die Werte in den Reifentabellen abgeleitet, die bei einer bestimmten Radlast und Fahrgeschwindigkeit einen konkreten Reifeninnendruck vorschreiben.

Die Reifen-Einfederung ist demnach der Regelparameter, der eine Reifendruck-Verstellanlage in eine vollautomatische Reifeninnendruck-Regelanlage verwandeln kann. Damit würde beim Regeln des Reifeninnendruckes die dynamische Radlast berücksichtigt und die maximal mögliche Kontaktfläche eingestellt, bei gleichzeitiger Vermeidung von Reifenschäden. Mit dieser Technologie wird im Sinne des Bodenschutzes unter den gegebenen Rahmenbedingungen der geringstmögliche Bodendruck realisiert - hier ist die Landtechnikindustrie gefordert, diese Innovation zukünftig in die Landmaschinen einzubauen.

Beispiele zur Anwendung von Entscheidungsmatrix und Erfolgskontrolle werden im folgenden Kapitel ab S. 51 "Maßnahmenkatalog - 15 Fallbeispiele für Gute fachliche Praxis" ausgeführt und belegen den Nutzen für die Bodenschonung. Bei der Messung der Bodensetzung handelt es sich um keine neue Methode (ARVIDSSON ET AL., 2001), sondern lediglich

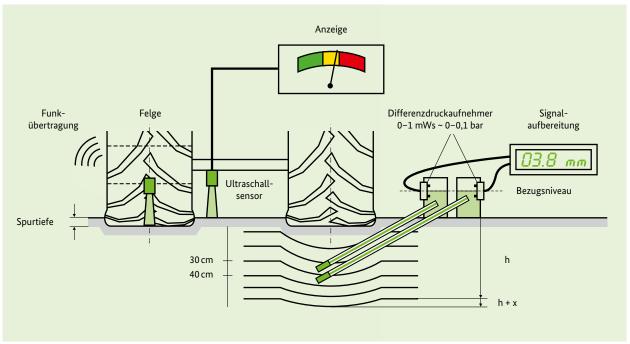


Abb. 3.23: Hydrostatische Setzungsmessung und Multisensorsystem an landwirtschaftlichen Maschinen – Prototyp (NOLTING ET AL., 2006)

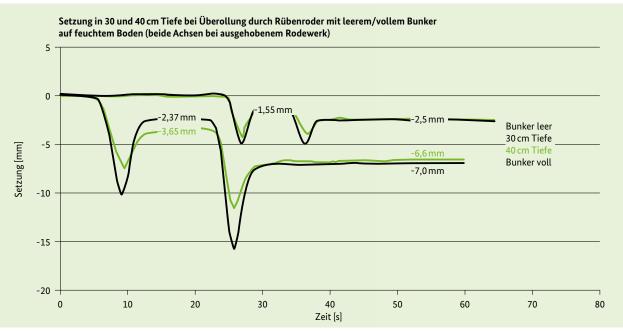


Abb. 3.24: Bodensetzung unter 6-reihigem Köpfrodebunker bei unterschiedlicher Bunkerfüllung (nach Pflugfurche zu Rüben) (NOLTING, 2006)

um eine Modifikation, die in kurzer Zeit eine Vielzahl von reproduzierbaren Messungen zulässt. Während es sich bei den bekannten Bodendruckmessungen um eine Momentaufnahme handelt (siehe S. 29 ff.), kann mit der Bodensetzung eine Veränderung angezeigt werden und ebenso, ob eine elastische bzw. plastische Verformung vorliegt. Die Bodensetzung in z. B. 40 cm Tiefe gibt die Fortsetzung der vertikalen Bodenbewegung von der Oberfläche in die Tiefe an. Damit wird die Spurtiefe hinsichtlich des Unterbodenschutzes interpretierbar.

Abb. 3.24 zeigt die Bodensetzung in 30 und 40 cm Tiefe bei unterschiedlicher Bunkerfüllung. Bei leerem Bunker (6 t) verursacht der Rübenroder 4 cm Spurtiefe, die in beiden Tiefen zu einer bleibenden Setzung (= plastische Verformung) von 2,5 mm führt. Bei vollem Bunker (10 t) werden 9 cm Spurtiefe erzeugt mit einer bleibenden Setzung von 7 mm in 30 cm Tiefe und 6,6 mm in 40 cm Tiefe. Inwieweit dies zu einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen führt, muss jeweils durch weitere bodenphysikalische Untersuchungen geklärt werden.

### Maßnahmenkatalog – 15 Fallbeispiele für Gute fachliche Praxis nach dem Konzept für bodenschonendes Befahren

Während im vorherigen Kapitel grundsätzliche wissenschaftliche Erkenntnisse zur Veränderung der Bodenstruktur beim Befahren des Bodens mit Landmaschinen vorgestellt wurden, geht es in diesem Kapitel um praktische Beispiele und Maßnahmen zur Bodenschonung. Sie sollen auf der einen Seite die Vielzahl der standort-, betriebs- und fruchtfolgespezifischen Möglichkeiten aufzeigen und andererseits die Berater, Landwirte und Lohnunternehmer inspirieren, in bodenschonende Techniken zu investieren bzw. Arbeitsketten so umzugestalten, dass kritische Bodenzustände bei der Bewirtschaftung berücksichtigt werden.

Acker- und pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten

#### Beispiel 1: Auswirkungen auf die Bodenstruktur bei der Zuckerrübenernte nach unterschiedlicher **Bodenbearbeitung**

(1) Skizze: Die Tragfähigkeit/Befahrbarkeit nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung kann überprüft werden im Rahmen eines Befahrungsversuches mit hohen Radlasten, z. B. eines 6-reihigen Köpfrodebunkers. Als Parameter eignen sich visuelle Parameter, wie die Spurtiefe, als auch Bodenparameter, wie Bodendruck und Bodensetzung.

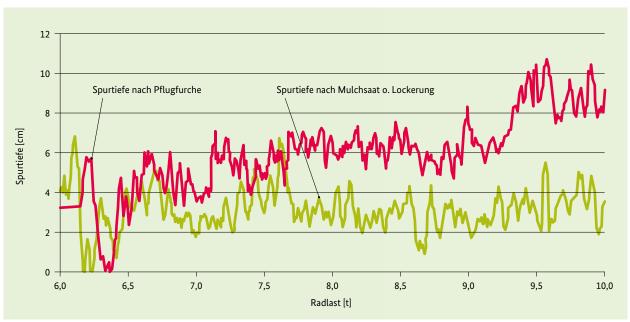


Abb. 3.25: Spurtiefe eines 6-reihigen Köpfrodebunkers nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von der Bunkerfüllung (SOMMER ET AL., 2001a)



Abb. 3.26: Bodendruck unter dem Vorderrad eines 6-reihigen Köpfrodebunkers bis in 40 cm Tiefe – Ut3, Löss (SOMMER ET AL., 2001b)

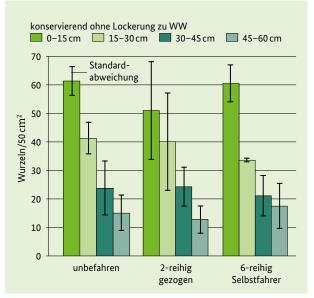


Abb. 3.27: Wurzeldichte bei Winterweizen nach Befahrung mit unterschiedlichen Zuckerrüben- Köpfrodebunkern (SOMMER ET AL., 2001b)

(2) Nachweis der Wirkung: Die Spurtiefe kann an der Bodenoberfläche als sichtbarer Ausdruck der Befahrbarkeit genutzt werden – ein Parameter, der für den Praktiker hilfreiche Information liefern kann. Die Spur fasst die Summe aller Kräftewirkungen in der Kontaktfläche Reifen/Boden zusammen und ist damit das Ergebnis der Interaktion zwischen der aktuellen Bodenstabilität (Bodenfeuchte, Humus, Lagerungsdichte, Aggregierung) und maschinenspezifischen Parametern (Reifenbauart, -innendruck, Kontaktfläche, Radlast, Triebradschlupf, Überrollhäufigkeit).

Abbildung 3.25 (siehe S. 51) zeigt den Verlauf der Spurtiefe nach Pflug und Mulchsaat ohne Lockerung mit zunehmender Bunkerfüllung eines Rübenroders. Während die Spurtiefe nach konservierender Bodenbearbeitung bei einer Radlaststeigerung von 6 auf 10t nahezu konstant bleibt, steigt sie nach konventioneller Bodenbearbeitung von 4 auf 9 cm an. Aufgrund dichterer Ausgangslagerung und stabilerer lebendverbauter Aggregate wird durch konservierende Bodenbearbeitung eine bessere Tragfähigkeit erreicht. Der Boden wird unter einem Reifen nach mehreren Seiten verdrängt. Da sich der Boden in keinem geschlossenen Behälter befindet, kann er zur Seite, nach vorn und hinten und nach unten ausweichen. Vor dem Hintergrund eines vorsorgenden Unterbodenschutzes sind besonders die vertikalen Bodendrücke wichtig. Sie wurden mit flexiblen Sonden (= Bollingsonden) gemessen. Bei Pflugfurche beträgt der Bodendruck unter 11 t Radlast (800/65 R 32) in 10 cm Tiefe 2,2 bar - er entspricht damit etwa dem Reifeninnendruck von 2,3 bar (Abb. 3.26). Nach Pflug wird der Druck bis auf 0,8 bar in 40 cm Tiefe abgebaut. In der Mulchsaat ohne Lockerung beträgt der Bodendruck im nahen Unterboden nur noch 0,3 bar - ein Zeichen für einen verbesserten Unterbodenschutz.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: In erosionsgefährdeten Gebieten wird heute ein Großteil der Zuckerrüben nach konservierender Bodenbearbeitung bestellt. Der Effekt einer verbesserten Tragfähigkeit wird von den Betriebsleitern zunehmend geschätzt. Bei der Einsatzplanung darf dies allerdings nicht dazu führen, dass Mulchsaatflächen immer dann gerodet werden, wenn gepflügte Flächen nicht mehr befahrbar sind. Da Bodenverdichtungen unter der Oberfläche visuell vom Praktiker kaum bemerkt werden, ist die Berücksichtigung der Spurtiefe der Indikator zur Sensibilisierung für Verdichtungen - dies gilt, seitdem mit Sensoren die Wirkung auf den Unterboden angezeigt werden kann (Abb. 3.23, S. 50). Die Spurtiefe wird online in der Kabine angezeigt, die Bodensetzung kann mit einem Handgerät (Prototyp) an repräsentativen Stellen im Acker gemessen werden. Dieses Konzept wird von der landwirtschaftlichen Praxis starren Reglementierungen vorgezogen. Eine industrielle Produktion ist zeitnah zu fordern.

#### Beispiel 2: Erhalt und Verbesserung der Durchwurzelbarkeit durch nichtwendende Bodenbearbeitung vor/nach der Zuckerrübenernte

(1) Skizze: Bei den Ernteverfahren hat es insbesondere bei Getreide, Zuckerrüben und Mais eine Entwicklung von Traktor gezogenen Maschinen mit geringer Arbeitsbreite hin zu Selbstfahrern mit großer Arbeitsbreite und großvolumigem Bunker gegeben. Mehrreihige Ernte und züchterischer Fortschritt beim Ertrag führten zu einer Steigerung der Gesamtmassen und Radlasten. Breite Reifen und eine Reduzierung der Überrollhäufigkeit infolge neuer Fahrwerkskonstruktionen versuchen negativen Auswirkungen auf Bodenstruktur und Pflanzenentwicklung entgegenzuwirken.

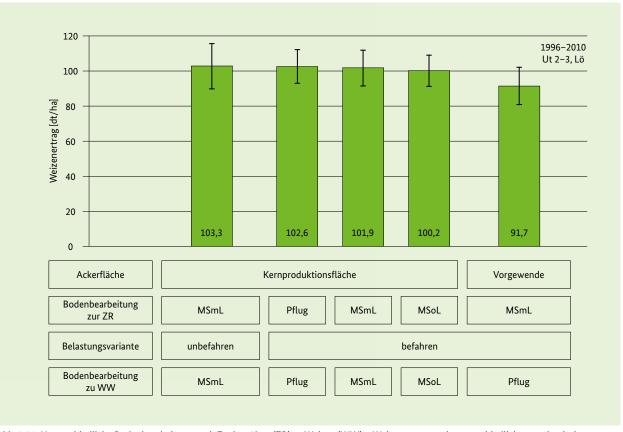


Abb. 3.28: Unterschiedliche Bodenbearbeitung nach Zuckerrüben (ZR) zu Weizen (WW) – Weizenertrag nach unterschiedlicher mechanischer Belastung auf der Kernproduktionsfläche und dem Vorgewende (MSmL/MSoL = Mulchsaat mit/ohne Lockerung) (BRUNOTTE ET AL., 2011a)

(2) Nachweis der Wirkung: Zur Einstufung der Ernteverfahren helfen neben zahlreichen bodenphysikalischen Kennwerten auch pflanzenbauliche Parameter. So kann gezeigt werden, dass beim Selbstfahrer die höhere Radlast von 10 t mit 1-facher Überrollung gegenüber der gezogenen Maschine mit geringerer Radlast von 1 bis 5 t und 6-facher Überrollung das Wurzelwachstum nicht stärker beeinträchtigt (Abb. 3.27). Das bedeutet, dass bei geringerer Radlast die Mehrfachbefahrung wie eine stufenweise Erhöhung der Radlast wirken kann (siehe auch TIJINK & SPOOR, 2004). So ist die Wurzelentwicklung nach 2-reihig gezogener Erntetechnik mit geringer Radlast nicht besser als nach 6-reihig selbstfahrender Erntetechnik. Der Vergleich beider Ernteverfahren mit dem unbefahrenen Zustand deutet auf die stabile Bodenstruktur nach konservierender Bodenbearbeitung bei mittlerer Feuchte ("feu 3") hin. Unterschiedliche Bodenbearbeitung vor Zuckerrüben erzeugt verschiedene Tragfähigkeiten für die Ernteverfahren. Der wichtigste Messparameter für den Landwirt ist der Ertrag der Folgefrucht Weizen - eine mechanische Lockerung von 10 - 25 cm Tiefe war im Mittel der 15 Jahre tendenziell ertragswirksam (Abb. 3.28). In der Kernproduktionsfläche hat der Weizenertrag im Vergleich zur Kontrolle "unbefahren" kaum auf die Befahrung reagiert. Nur bei flacher Bearbeitung (MSoL

= Mulchsaat ohne Lockerung bis 10 cm) ergibt sich eine

geringe Ertragsminderung von ca. 3 dt/ha, die statis-

tisch nicht abzusichern ist. Demnach ist bei Weizen-

- preisen von 20 Euro/dt eine krumentiefe Lockerung mit Pflug bzw. Grubber im Mittel der Jahre rentabel. Treten allerdings hohe Radlasten in Kombination mit hoher Überrollhäufigkeit auf, wie am Vorgewende, ist mit einem Minderertrag von ca. 10 % zu rechnen. Die Bodenbearbeitung nach Zuckerrüben in der Kernproduktionsfläche hat demnach eventuelle Verdichtungen in der Ackerkrume repariert, sodass die Ertragsfunktion nicht geschädigt wurde. Die Ertragsdepression im Vorgewendebereich, wo der Roder mehrfach an die Rübenmiete gefahren ist, deutet auf eine Beeinträchtigung der Bodenstruktur im nahen Unterboden hin. Dieser Unterschied zeigt, dass die Zuordnung der mechanischen Belastung auf Teilflächen des Ackerschlages außerordentlich wichtig ist (DUTTMANN ET AL., 2013).
- (3) Akzeptanz der Maßnahme: Die Untersuchungen zum Wurzelwachstum weisen darauf hin, dass die geringen Radlasten des 2-Reihers nicht in jedem Fall die bodenschonendere Technik charakterisieren, da hohe Überrollhäufigkeiten mitunter den positiven Effekt geringer Radlasten mindern können. Der Einsatz mehrreihiger Selbstfahrer hat bei Berücksichtigung der Regeln "Guter fachlicher Praxis" flächig zu keinen Ertragsdepressionen geführt. Arbeitswirtschaftliche Vorteile verbunden mit einer gesteigerten Rentabilität haben zu einer starken Ausdehnung der 6-reihigen Köpfrodebunker geführt, sodass heute mehr als 90% der Rübenfläche damit gerodet werden. Damit der einzelne Betrieb in einer

#### Beispiel 3: Biomasselogistik bei Silomais – Bodenzustandsänderung nach Ausbringung von Gärsubstrat

(1) Skizze: Wegen der steigenden Verbreitung von Biogasanlagen wurde der Silomais in vorhandene Fruchtfolgen aufgenommen. Aus phytosanitären Gründen (Maiszünzler, Mykotoxine bei Weizen, Rhizoctonia bei Zuckerrü-



Abb. 3.29: Bodensetzung in 30 cm Tiefe bei Befahrung mit Traktor + Gülletankwagen nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung (BRUNOTTE, 2013)



Abb. 3.30: Bodensetzung in 40cm Tiefe bei Befahrung mit Traktor + Gülletankwagen nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung (BRUNOTTE, 2013)

ben) wird vielerorts von der Beratung eine Pflugfurche vor und nach dem Mais empfohlen. Für den Bodenschutz bedeutet dies in Hanglagen eine Zunahme der Wassererosion und generell ein höheres Risiko von Bodenverdichtungen bei der Ausbringung von Gärsubstrat.

- (2) Nachweis der Wirkung: Die Ausbringung von Gärsubstrat erfolgt mit einem Traktor gezogenen Tandemgülletankwagen (Traktor, v: 600/70 R 34 = 1,45 bar, h: 710/75 R 42 = 1,35 bar) und Tandemfass (17 m³, 750/60 R 30.5 = 1,2 bar; siehe auch Tab. 3.2, S. 29). Nach Pflugfurche waren deutliche Spuren von > 15 cm Tiefe zu sehen. Die Fortsetzung der vertikalen Bodenbewegung führte zu folgenden Belastungsspitzen in der Unterkrume und im nahen Unterboden. Die 4 Achsen werden deutlich aufgezeichnet und die Peaks nehmen mit jeder zusätzlichen Überrollung zu (Abb. 3.29). Nach Pflug wird in 30 cm Tiefe eine maximale Bodensetzung von > 12 mm angezeigt - es verbleiben 10 mm, die eine plastische Verformung bedeuten. Bei Mulchsaat bleibt von den 3 mm nur 1 mm zurück, die Spurtiefe bewegte sich im Bereich der Stollenhöhe. Im nahen Unterboden (40 cm) bleiben von den 4 mm beim Pflug 2 mm als plastische Verformung bestehen. Bei Mulchsaat liegt eine elastische Verformung vor (Abb. 3.30).
- (3) Akzeptanz der Maßnahme: Obwohl bei der Ausbringung von Gärsubstrat eine Trennung des Straßen- und Feldtransportes realisiert wurde (daher rühren die geringen Reifeninnendrücke des Gülletankwagens), ist bei Pflugvorarbeit und 4 Überrollungen des Ausbringfahrzeuges mit Schäden an der Bodenstruktur zu rechnen. Langfristig sollte die nichtwendende Bodenbearbeitung in Verbindung mit dem Maisanbau mehr realisiert werden. Dafür hat insbesondere eine Verbesserung der Feldhygiene zu erfolgen, indem Erntereste vom Getreide bzw. Mais zusätzlich gemulcht werden, um eine schnellere Rotte zu erreichen – hierfür fehlt bisher in der Praxis weitestgehend die Akzeptanz. Auch liefert beim Ausbringen der Gülle ein Selbstfahrer mit Hundegang und angebauter Scheibenegge eine durchaus bodenschonende Alternative, da nur eine Überrollung stattfindet - diese Techniken werden inzwischen mehrfach eingesetzt.

#### Arbeitsverfahren bei der Bodennutzung

#### Beispiel 1: Auslastung von Ernteverfahren bei der Zuckerrübenernte/flexible Anpassung der Rodekapazität

(1) Skizze: Insbesondere Ernteverfahren stehen im Zwiespalt zwischen Rentabilität und Bodenschonung. Die teure Spezialmaschine, vom Maschinenring oder Lohnunternehmer angeboten, fordert für akzeptable Arbeitserledigungskosten eine hohe Auslastung pro Kampagne bzw. Jahr. Große Arbeitsbreiten und voluminöse Bunker reduzieren zwar die Überrollhäufigkeiten, führen aber zu einer hohen mechanischen Belastung der Bodenstruktur. In der Region Ambergau, westliches Harzvorland, betreibt eine Rodegenossenschaft vier 6-reihige Zuckerrübenroder. In der Region sind Lehmböden (bis 85% Schluff) und Tonböden (bis 40% Ton) in mehr oder weniger kupiertem Gelände verbreitet, und es fallen 750 bis 850 mm Niederschlag pro Jahr. Drei Strategien charakterisieren die Berücksichtigung von Bodenschutzbelangen:

- 1. Die Maschinen nur mit 650 statt mit 850 ha/ Kampagne auslasten;
- 2. Die Roder nutzen nur den eigenen Bunker. Ein parallelfahrendes Transportfahrzeug wird nur eingesetzt, wenn der Bunker die Schlaglänge nicht fasst;
- 3. In der Einsatzregion mit ca. 50 km Durchmesser erlaubt das Vorhandensein von vier Maschinen einen flexiblen Einsatz je nach Niederschlagsverteilung in der Region. Eine angepasste Abfuhrlogistik ist eine wichtige Voraussetzung für diese Strategie.
- (2) Nachweis der Wirkung: In der Rodegenossenschaft rodet ein Köpfrodebunker ca. 650 ha/Kampagne mit einer Rodeleistung von 12 ha/12-Stunden-Tag. Die Zeitspanne von September bis November umfasst theoretisch 92 Tage. Bei Berücksichtigung der 40-jährigen mittleren Niederschlagsverteilung stehen für das Gebiet ca. 54 "Befahrbarkeitstage" (SCHÄFER, 2011) zur Verfügung, die für 650 ha gebraucht werden.

Treten trotz der moderaten Auslastung aufgrund extrem feuchter Witterung in Ausnahmejahren Engpässe auf, wird die Rodearbeit mit verminderter Leistung fortgesetzt. Um die Erntemaschine an die höhere Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes anzupassen, wird der Bunker nur halb gefüllt und der Reifeninnendruck mit Hilfe großer Ventile an die verminderte Last ange-

Reduzierung von Last und Erhöhung von Kontaktfläche ermöglichen die notwendige Bodenschonung. Voraussetzung für diesen Lösungsansatz ist, dass der Ackerschlag nicht länger als 400 bis 500 m ist. So kann an beiden Vorgewenden abgebunkert werden, wenn Lkw-taugliche Feldwege vorhanden sind. Bei einer gesteigerten Kampagneleistung von 800 ha würden die Rodekosten von 220 Euro/ha auf 200 Euro/ha sinken, es müssen aber statt 54 Tage 66 Tage, also 12 Tage mehr in der Kampagne gerodet werden (statische Betrachtung; unterschiedliche Auslastung in h/Tag zu Beginn und am Ende der Kampagne nicht berücksichtigt). Diese 12 zusätzlichen Rodetage fallen im Mittel der Jahre in den Bereich der "Nichtbefahrbarkeitstage" mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Bodenstruktur und evtl. steigenden Arbeitserledigungskosten bei der Bestellung der Folgefrucht.

Infolge des feuchteren Bodens müsste bei der Weizenbestellung vom Grubber auf den Pflug übergegangen werden, was 30 Euro/ha höhere Kosten verursachen würde. Die evtl. auftretenden Ertragsminderungen, aufgrund höherer Bodenfeuchte beim Roden und bei der nachgewiesen werden (BRUNOTTE, 2007).

Werden zur Steigerung der täglichen Rodeleistung permanent parallel fahrende Transportfahrzeug eingesetzt, steigt die mechanische Belastung durch die Verdopplung der Überrollhäufigkeit enorm an. Durch die höhere Belastung sinken die "Befahrbarkeitstage" auf 37 ab – eine Steigerung der Kampagneleistung ist so nicht zu erzielen. Stattdessen würden die Rodekosten ansteigen. Würde eine gesteigerte Flächenleistung an 54 Tagen mit permanenten Parallelfahrern erfolgen, drohen die Regeln Guter fachlicher Praxis mit hoher Wahrscheinlichkeit verletzt zu werden.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Die herabgesetzte Ausnutzung der Jahresleistung schafft den Puffer, um auf Witterungsextreme mit Rodepausen zu reagieren und die Bodenstruktur des einzelnen Landwirts zu schonen. Dies hilft, die Aufwendungen bei der Folgebestellung zu halten und evtl. Ertragsdepressionen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund ist in der Rodegenossenschaft Ambergau der einzelne Betrieb gern bereit, 20 Euro/ha höhere Rodekosten zu zahlen. Diese fallen in Wirklichkeit gar nicht an, wenn die geringere Auslastung/Jahr nach Abschreibung der Maschine durch Nutzung eines weiteren Jahres angehängt wird.

#### Beispiel 2: Mähdrusch – Einfluss von Auslastung/ Schlagkraft auf Kosten von Qualitätsparametern und Bodenschonung

- (1) Skizze: Im langjährigen Mittel fallen im Klimagebiet 5/6 im Haupterntemonat August 77 mm Niederschlag (KTBL: Klimagebiete für Feldarbeistage, vgl. dazu KTBL-Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft 2020/21). Je nach Region schwanken die zur Verfügung stehenden Feldarbeitstage, d. h. Mähdruschstunden, stark (KTBL, 2014c). Die Planung von Investitionen kann demnach nicht nur trockene Erntebedingungen zugrunde legen. Parameter, wie Fixkosten, Trocknungskosten, Qualitätsminderung, Vertragserfüllung und Fruchtfolge nehmen Einfluss auf den wirtschaftlichen Erfolg. Als Hypothese wird formuliert: "ein Mähdrescher wird statt mit 400 ha nur mit 300 ha/a ausgelastet." Dies kann ein Betrieb bzw. der Zusammenschluss mehrerer Betriebe sein (= Annahme 1).
- (2) Nachweis der Wirkung: Durch die höhere Auslastung des Mähdreschers von 400 gegenüber 300 ha/a entstehen zwar 14 Euro/ha geringere Fixkosten (= 52 statt 66 Euro/ ha für AfA und Zins => 5.600 Euro/a), annähernd diese Summe ist aber als höherer Restwert bei dem Mähdrescher mit geringerer Auslastung am Ende der Nutzungszeit zu erzielen. Dadurch kann diese Kalkulation beim Vergleich der unterschiedlichen Auslastungsgrade vernachlässigt werden. Es bleibt die Betrachtung der Qualitätsparameter.

Es entstehen höhere Trocknungskosten von ca. 2 Euro/dt, da die 100 ha Mehr an Getreide mit höheren Feuchtegehalten komplett getrocknet werden müssen (= Annahme 2: => 100 ha x 80 dt/ha = 8.000 dt x 2 Euro/dt = 16.000 Euro).

Weiter treten bei verspäteter Getreideernte Qualitätsverluste auf. Kann eine Partie nicht mehr als Brotgetreide, sondern nur noch als Futtergetreide vermarktet werden (= Annahme 3), können wie in 2010 bis zu 5 Euro/dt geringere Verkaufspreise erzielt werden. Wird für unser Beispiel nur 3 Euro Minderpreis/dt für 8.000 dt angenommen, entsteht ein Verlust von 24.000 Euro. Verschärft wird dieser Sachverhalt noch bei Abschluss von Qualitätsweizen-Vorkontrakten.

Eine durch hohe Mähdrescherauslastung verspätete Ernte verzögert die Verrottung der Reststoffe, verkürzt die Zeit für Bodenbearbeitungsmaßnahmen und lässt weniger Zeit für den Anbau von Zwischenfrüchten. Dies kann sich nachteilig auf die pfluglose Bestellung der folgenden Winterung auswirken – diese Effekte sind jedoch schwer monetär zu beurteilen.

Wird ein Teil der Mähdruschernte unter feuchten Bedingungen durchgeführt, steigt auch die Gefahr, den Oberboden in seiner Struktur beim Befahren zu beeinträchtigen. Statt einer flach mischenden Stoppelbearbeitung müssen die Spuren unterfahren werden, mit leicht erhöhten Kosten für die tiefere Lockerung in Höhe von 15 Euro/ha x 100 ha = 1.500 Euro.

Bei feuchten Erntebedingungen können also zusätzliche Kosten für Trocknung, Qualitätsminderung und Bodenbearbeitung in Höhe von 41.500 Euro entstehen.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Betriebswirtschaftlich werden hohe Auslastungsgrade bei den Erntemaschinen gefordert – dies hat unter den Betriebsleitern eine hohe Akzeptanz, da die Rentabilität bei der Einkommenssicherung eine große Rolle spielt. Ein weitaus besseres Ergebnis lässt sich allerdings erzielen, wenn die nicht realisierte Erntefläche pro Jahr (hier 100 ha) am Ende der Nutzungsdauer angehängt wird, vorausgesetzt, es kommt im technischen Fortschritt zu keinen bahnbrechenden Neuerungen.

Durch eine hohe Auslastung in Jahren mit ungünstigen Witterungsbedingungen, können zusätzliche Kosten von 415 Euro/ha (41.500 Euro: 100 ha) entstehen. Wird zum Schluss die Eintrittswahrscheinlichkeit solch ungünstiger Erntebedingungen von 1-mal in 10 Jahren (= Annahme 4) berücksichtigt, fallen tatsächlich 41,50 Euro/ha zusätzliche Kosten in jedem Jahr an. Die Akzeptanz für reduzierte Auslastungsgrade pro Jahr ist bisher sehr gering, sollte aber vor dem Hintergrund von Qualitätssicherung und Bodenschonung zukünftig mehr Berücksichtigung finden.

### Beispiel 3: Regelfahrspurverfahren – Controlled Traffic Farming

(1) **Skizze:** Die Idee von Regelfahrspurverfahren, auch als Controlled Traffic Farming (CTF) bezeichnet, versucht

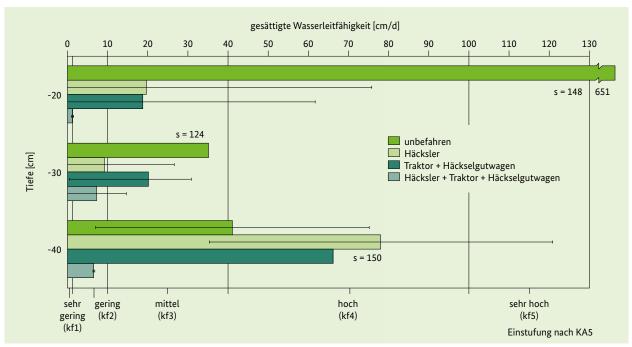


Abb. 3.31: Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernte (Ut 2-3, Lö) (BRUNOTTE ET AL., 2011a)

den Widerspruch zwischen einem für die Anforderungen des Pflanzenwachstums optimalen Bodenzustand und den Auswirkungen des Fahrens auf dem Feld dadurch aufzulösen, dass die Bereiche für das "Wachsen" der Pflanzen und das "Fahren" der Landmaschinen räumlich getrennt werden.

Dieses Prinzip wird im Feldgemüsebau als Beetanbau praktiziert. Für den großflächigen Anbau von Körnerund Hackfrüchten sollen Regelfahrspurverfahren diese strikte Trennung durch die Konzentration allen Fahrverkehrs im Feld auf feste Fahrspuren bewirken. Seit etwa 10 Jahren bieten neue technische Entwicklungen die Chance, diese Idee erfolgreich umzusetzen: hochgenaue, GPS basierte Lenksysteme für Landmaschinen, leistungsfähige Traktoren, Bestellsysteme mit 6, 9 und 12 m Arbeitsbreite und Erntemaschinen mit gleichen Schnittbreiten eröffnen die Möglichkeit, Regelfahrspurverfahren zu realisieren.

Die Umsetzung ist in unterschiedlicher Intensität und Ausprägung möglich, automatische Lenksysteme helfen enorm bei der Realisierung von CTF. Mechanische Anzeigesysteme (Spuranzeiger, Nachauflaufmarkierungen) sind insgesamt aufwendiger. Mit zunehmender Verbreitung automatischer Lenksysteme wird die Beibehaltung der Lage der Fahrgassen/Pflegespuren immer häufiger praktiziert. Beobachtungen haben gezeigt, dass sie durch das häufige Befahren auch nach intensiver Bearbeitung in ihrer Struktur gestört bleiben und zumindest im Folgejahr das Pflanzenwachstum negativ beeinflussen. Bei einer "ortsfesten" Pflegespur wird diese negative Auswirkung nicht ertragsrelevant. Eine weitere Möglichkeit ist die Vorplanung der Fahrwege für (alle) Feldarbeiten mit Hilfe geeigneter Programme (Schlagkartei mit GIS-Funktionalität), um die Fahrwege im Feld in Abhängigkeit von den Arbeitsbreiten und den Kapazitäten

(Behälterfassungsvermögen) zu minimieren. Es können alternative Wenderegime Anwendung finden, Abschaltzonen für Sägeräte, Mineraldüngerstreuer und Pflanzenschutzspritzen definiert, und günstige Bereiche für die Ein- und die Ausfahrt aus dem Feld festgelegt werden. Beim "idealen" Regelfahrspurverfahren CTF werden alle Gerätearbeitsbreiten aufeinander abgestimmt bzw. vereinheitlicht und alle Bewirtschaftungsmaßnahmen auf möglichst wenigen, identischen Fahrspuren durchgeführt. Bei einem System für Mähdruschfrüchte mit 9 m Arbeitsbreite für Bodenbearbeitung, Aussaat und Ernte erfolgt der Pflanzenschutz mit 27 m oder 36 m. In die Systembreite von 9 m lassen sich bei Bedarf auch Geräte mit 4,5 m Arbeitsbreite integrieren (intensive Bodenbearbeitung). Ein ähnliches Modell lässt sich auch mit 6 m Systembreite (Mähdrusch 6 m oder 12 m, Pflanzenschutz 24 m oder 30 m) realisieren. Im nicht arrondierten Betrieb ist es (in Deutschland und Westeuropa) nicht möglich, Traktoren und Mähdrescher mit identischer Spurweite einzusetzen, da die StVZO für die Straßenfahrt nicht einzuhalten wäre. Deshalb ist es bei CTF unter unseren Verhältnissen notwendig, Traktoren und Erntemaschinen mit bodenschonenden Reifen/ Fahrwerken einzusetzen.

(2) Nachweis der Wirkung: Die Nutzung von automatischen Lenksystemen ohne Regelfahrspurverfahren ermöglicht es, Überlappungen bei allen Feldarbeiten zu vermindern und die Gerätearbeitsbreite auch bei der Arbeit in Beeten vollkommen auszunutzen. Durch die Reduzierung der Überlappungen im Bereich von 5 bis 10% wird auch der Anteil der überfahrenen Fläche, die einer erhöhten Bodenbelastung und damit einem Verdichtungsrisiko ausgesetzt ist, um den gleichen Anteil reduziert. Diese Reduzierung der Bodenbelastung kommt besonders am

variable Kosten von etwa 0,25 Euro/ha (BRUNOTTE ET. AL., 2011b). Die intensiv befahrenen und zumeist stark in ihrer Struktur gestörten (verdichteten) Pflegespuren machen etwa 3 bis 5 % der Fläche eines Feldes aus. "Ortsfeste" Fahrgassen vermeiden eine negative Auswirkung auf den Pflanzenertrag in diesen Bereichen. Die Potenziale einer optimalen Abstimmung zwischen Schlaggröße, Schlagform und Maschinenkenngrößen bezüglich Bodenschonung und Kosteneinsparung haben Brunotte und Fröba (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007) detailliert dargestellt. Die Vorplanung der Fahrspuren und das "Abarbeiten" dieser Planung mit Hilfe automatischer Lenksysteme machen einen Teil dieser Potenziale auch bei gegebener Schlaggröße, Schlagform und Mechanisierung nutzbar. Besonders in Australien hat sich CTF seit 2000 stark verbreitet. Es wird geschätzt, dass 2009 etwa 3 Millionen Hektar Ackerfläche mit Regelfahrspurverfahren bewirtschaftet wurden. Die australischen Ackerbauern erwarten sich dadurch eine erhöhte Wasserinfiltration, lockerere Bodenstrukturen, einen ungehinderten Gasaustausch, eine verminderte Erosionsanfälligkeit, verbesserte Feldaufgänge, eine intensive Durchwurzelung und dadurch stabilere und höhere Erträge. LI ET AL. (2004) haben in einer mehrjährigen Untersuchung in Australien bei Getreide Mehrerträge von durchschnittlich knapp 10 % nachgewiesen, obwohl im Bereich der Fahrspuren (14 % Flächenanteil bei 9 m System-Arbeitsbreite) nichts wächst. Daneben konnten sie einen deutlichen Rückgang der Erosion und nach 2 bis 3 Jahren des Zugkraftbedarfes bei der Bodenbearbeitung um 40% belegen.

Vorbeet zum Tragen, wenn auf Schwalbenschwanzwen-

dung verzichtet werden kann. Automatische Lenksys-

teme für Traktoren und Erntemaschinen verursachen

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Je nach Ausprägung und Anforderung erfolgt die Anwendung von CTF in der Landwirtschaft sehr unterschiedlich. Entscheidend sind die Verfügbarkeit von hochgenauen Lenksystemen auf den Schlüsselmaschinen bzw. auf allen Maschinen eines Betriebes, das Interesse des Betriebsleiters und der Wille und die Disziplin aller Beteiligten an der Umsetzung. Über Jahre hinweg werden "ortsfeste" Fahrgassen von einer großen Anzahl von Landwirten praktiziert, die hochgenaue Lenksysteme auf ihren Betrieben einsetzen. Die darauf aufbauende Vorplanung der Fahrwege bei der Feldbestellung setzt entsprechende Software (geographische Schlagkartei mit Planungswerkzeugen) voraus. Bisher ist das Angebot hierfür gering und die Planungswerkzeuge sind noch unzureichend. Die bisherigen Anwender leisten Pionierarbeit und führen die Optimierung zumeist "händisch" im "Trial-and-Error" Verfahren durch.

Obwohl bereits erste Betriebe, mit großen Flächen und kritischen, da druckempfindlichen Böden, versuchen, ein "ideales" Controlled Traffic Farming umzusetzen, muss es zunächst gelten, die in Australien festgestellten und auch bei uns erwarteten Effekte zu verifizieren. Derzeit untersuchen

Forschungsvorhaben in England, Dänemark, der Schweiz, der Slowakei und Deutschland, wie sich Regelfahrspurverfahren unter europäischen Verhältnissen (Boden, Klima, Fruchtfolgen, Mechanisierung) umsetzen lassen und ob ähnliche Effekte wie in Australien erzielt werden können. Darüber hinaus besteht bei uns die große Herausforderung, Hackfrüchte wie Zuckerrüben und Kartoffeln in das System zu integrieren (DEMMEL ET AL., 2010).

### Beispiel 4: Verfahrensvergleich bei der Silomaisernte – Parallelverfahren contra Bunkerverfahren

- (1) Skizze: Beim Silomaisanbau ist neben der Gärsubstratausbringung die Mechanisierungskette der Ernte hinsichtlich Bodenschonung zu betrachten. Heute ist das einphasige Verfahren verbreitet, bei dem das Erntegut auf parallel fahrende Häckselgutwagen gefördert wird. Darin unterscheidet sich die Maisernte grundsätzlich von der Rübenernte. Relevant für den Bodenschutz ist die Frage, ob die höhere Anzahl Überrollungen im Vergleich zur Bunkermaschine zu einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen führen kann.
- (2) Nachweis der Wirkung: Die Messung unter dem Maishäcksler führt in 30 cm Tiefe zu einer maximalen Setzung von 2,7 mm und der Boden federt bis auf 0,75 mm zurück. In 40 cm sind die Ausschläge bei der Befahrung geringer - der Boden federt elastisch zurück, sodass keine bleibende Setzung gemessen wird. Das Ergebnis der Setzungsmessung wird beispielhaft anhand der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) validiert (Abb. 3.31, S. 57). In 20 cm ist die Minderung von kf durch die Befahrung von sehr hoch auf mittel (Einstufung nach der bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5, AD-HOC-AG, 2005) deutlich zu spüren - die lockere Lagerung der Krume ist dafür verantwortlich. Der Horizont "Krumenbasis" (30 cm) ist durch jahrelange Bewirtschaftung insgesamt dichter. Die Wasserleitfähigkeit nimmt von der Stufe "mittel" auf "gering" ab - belegt also die bleibende Setzung von 0,75 mm. Im nahen Unterboden sind insgesamt die Kennwerte wieder leicht erhöht. Die Werte des Häckslers liegen höher als unbefahren und weisen auf die natürliche Streuung der Standorte bzw. der Horizonte hin. Dies entspricht der vollelastischen Setzungsmessung in 40 cm Tiefe. Weiter ist der Einfluss der Mehrfachüberrollung durch Häcksler und Transportfahrzeug deutlich zu erkennen - die Leitfähigkeit nimmt von der Stufe "hoch" auf "gering" ab.

Die Ursache für die oben dargestellte tatsächliche Belastung einer Ackerfläche ist, neben der Radlast und dem Reifeninnendruck, zu finden in der räumlichen Verteilung der Fahrspuren (= Spurflächenanteil) und der Überrollhäufigkeit (= Anzahl Achsen in einer Spur). Den folgenden Aussagen liegt zugrunde: Frischmasseertrag 500 dt/ha, Schlagabmessungen 5 ha, 316 m lang, Arbeitsbreite Häcksler 4,5 m, Transportfahrzeug bzw. Bunker können die Erntemenge einer kompletten Überfahrt aufnehmen.

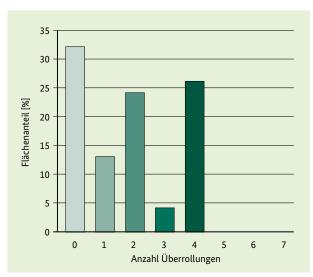


Abb. 3.32: Spurflächenanteil der unterschiedlichen Überrollhäufigkeit bei Spur versetzter Fahrt des Transportfahrzeuges (FRÖBA, 2012; KTBL, 2012c)

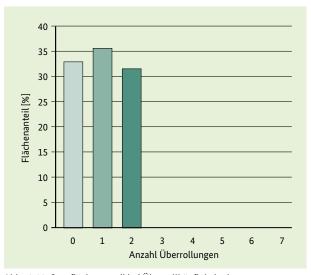


Abb.: 3.33: Spurflächenanteil bei Überrollhäufigkeit eines Bunkerhäckslers bei Spur versetzter Fahrt durch Hundeganglenkung (FRÖBA, 2012; KTBL, 2012c)

Für die Darstellung (Abb. 3.32) wird die Befahrvariante herausgegriffen, bei der der Traktor (h: 710/70 R38) mit Häckselgutwagen (710/50 R26.5) Spur versetzt zum Häcksler (v: 800/65 R32) fährt. 32 % der Fläche sind unbefahren und 68% überrollt. Der Häcksler überrollt 24% der Fläche zweifach mit 1 bar Reifeninnendruck. Kritisch sind dagegen die 26% Spurfläche mit 4-facher Überrollung durch Traktor und Häckselgutwagen, weil der Reifeninnendruck des Tandemanhängers mit > 3,5 bar an die hohe Geschwindigkeit von 40 bis 50 km/h auf der Straße angepasst ist.

Eine Trennung von Acker- und Straßentransport mit Umschlag des Erntegutes am Feldrand würde das Parallelverfahren bodenschonender gestalten, da eine Reduzierung des Reifeninnendruckes beim Traktor auf 1 bar und beim Häckselgutwagen auf 1,5 bar zu erreichen wäre. Damit könnte die Forderung der VDI-Richtlinie 6101 (VDI, 2007) nach maximal 2 bar bei Ernteverfahren eingehalten werden.

Beim Übergang vom Parallelverfahren zum Bunkerverfahren erfolgt am Feldrand die Gutübergabe auf Straßentransportfahrzeuge (durch stationäre/mobile Überladetechnik). Die Lasten von Häcksler und Bunker stützen sich auf 800/65 R32 und 710/50 R26.5 Reifen ab und lassen Reifeninnendrücke von 1 bis 1,5 bar realisieren. Die unbefahrene Fläche von 33 % entspricht der beim Parallelverfahren (Abb. 3.33). Es sind aber 36% nur 1-fach und 32% der Fläche nur 2-fach mit geringem Reifeninnendruck überrollt.

Die Kopplung von geringem Reifeninnendruck und geringer Überrollhäufigkeit macht dieses Verfahren zur bodenschonendsten Variante. Es fallen allerdings zusätzliche Kosten beim Einsatz des Bunkerhäckslers in Höhe von 40 Euro/ha an, da u.a. die Ernteleistung (t/h bzw. ha/h) durch das Überladen am Feldrand sinkt. Wenn nach der Aberntung von Blattfrüchten (Silomais, Kartoffeln, Zuckerrüben) eine Sommerung folgt, wird in der Praxis oft auf eine Bodenbearbeitung im Herbst

verzichtet. Die skizzierten Spurflächenanteile von 50 bis 100% bergen allerdings ein erhöhtes Risiko für Wassererosion, da die Infiltrationsleistung in den Spuren stark herabgesetzt ist. Im Sinne "Guter fachlicher Praxis" empfiehlt es sich, einen Bearbeitungsgang vor Winter durchzuführen, der die Spuren aufbricht und eine raue Oberfläche über Winter schafft.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Der Einstieg in die Maisernte ist mit parallelfahrenden Transportfahrzeugen erfolgt, z.T. sogar mit vorhandenen Ladewagen oder Gliederzügen. Da die Flächenleistung und die kostengünstige Ernte im Vordergrund stehen, wird es freiwillig im engen Radius um die Biogasanlage keinen Wechsel zur Trennung von Feld-Straßentransport geben. Anders dagegen, wenn die Landkreise aufgrund der Verkehrssicherheit diese Trennung vorschreiben. Auch finden Bodenschutzargumente bisher kaum Berücksichtigung. Würden die Transportfahrzeuge nur auf dem Acker fahren, könnte man den Reifeninnendruck auf unter 1,5 bar erheblich verringern. Der Einsatz des Bunkerhäckslers, als bodenschonendste Variante, wird zurzeit wegen der reduzierten Ernteleistung und aus Kostengründen kaum realisiert

Offensichtlich besteht ein Zielkonflikt zwischen phytosanitären Anforderungen und Bodenschutzanforderungen. Zur Erzielung eines hohen Grades bei der Bodenschonung müssten die parallel fahrenden Transportfahrzeuge eine neue Spur neben dem Häcksler anlegen. Dies führt allerdings dazu, dass 40% der Stoppeln beim Mulchen nicht erfasst werden. Dieser zusätzliche Arbeitsgang von 50 Euro/ha ist also nicht nur teuer, sondern auch ineffizient - er findet keine breite Akzeptanz in der Praxis. Vor dem Hintergrund wird häufig der Pflug eingesetzt, der allerdings das Problem der Feldhygiene nur sehr kurzfristig löst und eine geringe Tragfähigkeit des Bodens beim Anbau der Folgefrucht, z.B. Weizen, schafft.

## Beispiel 1: Aufsattel- und Anhänge- statt Anbaugeräte mit vergleichbarer Arbeitskapazität

(1) Skizze: Wegen der guten Wendigkeit werden besonders in kleinstrukturierten Gebieten meist angebaute Arbeitsgeräte eingesetzt. Angebaute Geräte erhöhen zudem die Triebkraft des Traktors, da Vertikalkräfte vom Gerät auf den Traktor übertragen werden. Bei Geräten, die keine oder nur geringe Zugkraft erfordern, ist dieser Effekt ohne Bedeutung.

Aufsattel- und Anhängegeräte sind wegen der schlechteren Wendigkeit eher auf großen Flächen üblich. Die Traktoren müssen bei gleicher Arbeitsbreite zur Übertragung der Triebkräfte schwerer sein. Bei aufgesattelten Geräten helfen sogenannte Traktionshilfen, die einen Teil der Vertikalkräfte während der Arbeit auf den Traktor übertragen, um die benötigte Traktormasse zu reduzieren. Da die auftretenden Radlasten – im Vergleich zu angebauten Geräten beim Wenden – niedriger sind, kann der Reifeninnendruck geringer sein und die übertragbare Zugkraft wird damit vergrößert. Bei aufgesattelten und angehängten Arbeitsgeräten zur Ausbringung von Betriebsmitteln werden in der Regel

größere Vorratsbehälter (Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzflüssigkeit) als bei angebauten Geräten verwendet. Damit sind geringere Beladezeiten und höhere Feldflächenleistungen möglich.

Durch Heckanbaugeräte wird die Vorderachse entlastet, und es muss ein Frontballast verwendet werden, um die Mindestvorderachslast einzuhalten und ein sicheres Fahren zu gewährleisten.

(2) Nachweis der Wirkung: Bei angebauten Arbeitsgeräten können leichte Traktoren für Zugarbeiten eingesetzt werden. Beim Wendevorgang mit ausgehobenem Gerät auf dem Vorgewende treten höhere mechanische Belastungen im Vergleich mit aufgesattelten und angehängten Geräten auf. Für die Straßenfahrt mit Bestellkombinationen, deren Saatguttank gefüllt ist, muss der Reifeninnendruck an diese Maximalbelastung angepasst werden und ist damit für den Feldeinsatz viel zu hoch.

Günstiger zu beurteilen sind angehängte oder aufgesattelte Geräte, die einen sehr viel geringeren Reifeninnendruck am Traktor zulassen. Dies führt auf der Fläche und insbesondere am Vorgewende zu einer erheblichen Minderung der Bodenbelastung.

Abb. 3.34 zeigt die dynamischen Radlasten, gemessen mit einem Sensorsystem im Reifen (vgl. S. 49 und Abb. 3.23 auf S. 50), am Beispiel des gleichen Grubbers in angebauter und angehängter Variante. Im Kernfeld sind die

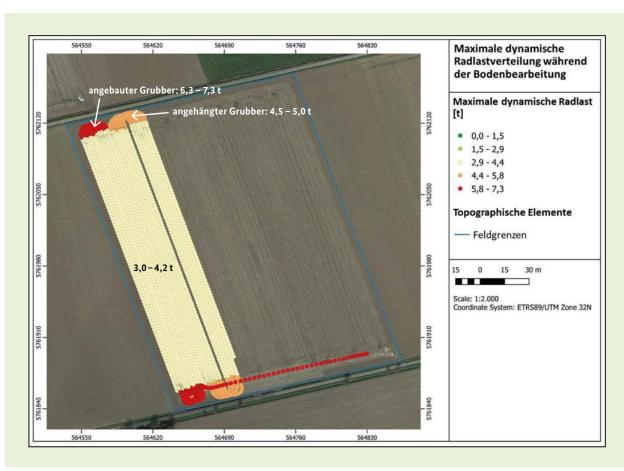


Abb. 3.34: Dynamische Radlasten beim Grubbern mit angebautem (ausgehoben) und angehängtem Grubber (LORENZ, 2022)

Unterschiede zwischen den beiden Techniken gering. Im Vorgewende treten jedoch beim ausgehobenen Gerät erheblich größere dynamische Radlasten auf der Hinterachse auf, als beim angehängten. Diese können bis zu ca. 2t höher sein, als beim angehängten Grubber.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Die weiterhin wachsenden Betriebe in ganz Deutschland, verbunden mit größeren Transportentfernungen und gestiegenen Ansprüchen an die Feldflächenleistung, und die steigende Nutzung von Dienstleistern führen zu einer ständig steigenden Verbreitung von aufgesattelten und angehängten Geräten. Größere Betriebe und Dienstleister können die in der Anschaffung teureren Maschinen ausreichend auslasten und damit meist noch zusätzlich die Arbeitserledigungskosten senken. Die Vermeidung von Folgekosten, wie Ertragseinbußen oder erhöhter Aufwand zur Bodenbearbeitung, fördern zusätzlich die Akzeptanz der Maßnahme.

## Beispiel 2: Bandfahrwerke im Vergleich zu Radfahrwerken

(1) Skizze: Bandfahrwerke haben im Vergleich zu Radfahrwerken größere Aufstandsflächen (z. B. 17.800 cm² statt 10.000 cm² bei Reifen), woraus sich rechnerisch ein geringerer Kontaktflächendruck ergibt. Je nach Fahrwerkskonstruktion entstehen unter den Umlenk- und Tragrollen allerdings Druckspitzen, die Lauffläche verweilt auch länger auf der entsprechenden Bodenstelle. Bandfahrwerke werden vornehmlich verwendet, wenn mit breiten Reifen (z.B. bauartbedingt bei Mähdreschern mit Tangentialdreschwerk) die Vorgaben der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung zur Fahrzeugbreite für die Straßenfahrt (3 m oder 3,5 m bei vereinfachter Ausnahmegenehmigung in vielen Bundesländern) nicht einzuhalten sind oder die Vertikallast am Fahrwerk die potenzielle Tragfähigkeit von Reifen übersteigt (z. B. Zuckerrübenroder mit 15 t Vertikallast) oder wenn

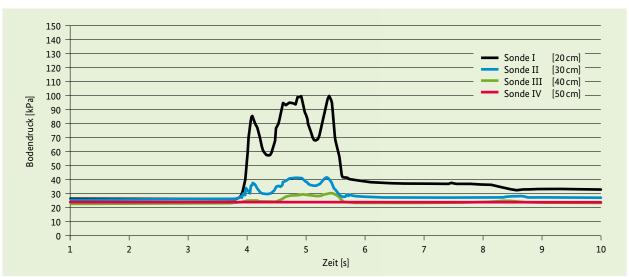


Abb. 3.35: Bodendrücke bei Überrollung mit Bandfahrwerk (Auflast 11,3 t, Bandlänge x -breite: 2.000 x 890 mm (GEISCHEDER, 2011)

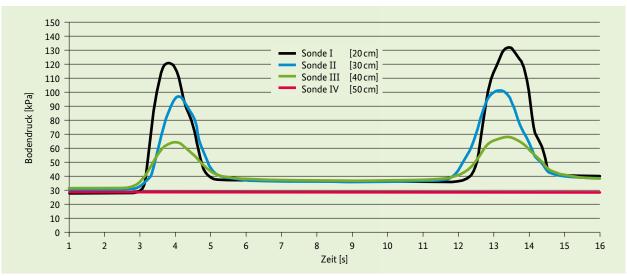


Abb. 3.36: Bodendrücke bei Überrollung mit zwei Rädern (Radlast je 5,2 t, Radialreifen 1.050/50 R32, Reifeninnendruck = 70 bar) (GEISCHEDER, 2011)

(2) Nachweis der Wirkung: Die Wirkungen von Bandfahrwerken auf Bodendruck und Bodengefüge im Vergleich zu Radfahrwerken wurden in den letzten Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht (GEI-SCHEDER, 2011; BRANDHUBER ET AL., 2010; GEISCHEDER ET AL., 2007; ANSORGE & GODWIN, 2007; STAHL ET AL., 2005; BRUNOTTE ET AL., 2004). Die wissenschaftlichen Untersuchungen kamen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die Bodendrücke unter Bandfahrwerken mit der Tiefe schneller abgebaut werden als unter Radfahrwerken. Verdichtungen durch höhere Bodendrücke waren unter Rädern im Unterboden nicht in allen Fällen nachweisbar.

Folgend werden einige Untersuchungsergebnisse vorgestellt:

## Vergleich einzelner Fahrwerkskomponenten/ Fahrwerke

## Vergleich Band (1-mal-Überrollung mit 11 t Auflast) mit Rad (2-mal-Überrollung mit je 5 t Radlast):

Böden einer Versuchsfläche im Raum Ingolstadt, Bayern (sandiger Lehm, Pflugfurche, Wassergehalt ca. 32 Vol.-%, entspricht 100 % Feldkapazität) wurden jeweils mit einer Gesamtlast von ca. 11 t überrollt, die auf 1 Band und alternativ auf 2 Räder verteilt war (Geischeder 2011). Der aus den Aufstandsflächen von Band und Rädern ermittelte mittlere Kontaktflächendruck lag in beiden Varianten bei etwa 70 kPa. Die Ergebnisse der Bodendruckmessungen (mit Schlauchdrucksonden) zeigen (Abb. 3.35/3.36, S. 61), dass die einmalige Überrollung mit Bandfahrwerk eine geringere Tiefenwirkung des Bodendrucks verursachte als die Überrollungen mit 2 Rädern. Im Unterboden reichte der Bodendruck in keiner der beiden Varianten aus, um Änderungen der gemessenen bodenphysikalischen Parameter zu bewirken.

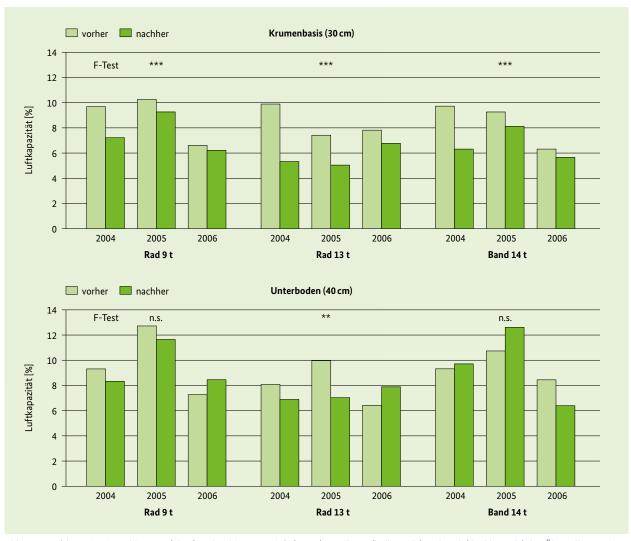


Abb. 3.37: Luftkapazität in 28 bis 33 cm (oben) und 38 bis 43 cm Tiefe (unten) jeweils vor (helle Säule) und nach (dunkle Säule) den Überrollungen in den Jahren 2004, 2005 und 2006 (GEISCHEDER, 2011)

## Vergleich Band (1-mal-Überrollung mit 14 t) mit Rad (1-mal-Überrollung mit 13 t und alternativ mit 9 t):

In Südostbayern wurden Lösslehmböden nach Pflugfurche in denselben Spuren über drei Jahre im Herbst mit einem Bandfahrwerk (14t Auflast) und zwei Radvarianten (Einfachüberrollung mit 13t und alternativ mit 9t Radlast, Reifeninnendrücke nach Reifendrucktabelle eingestellt) überrollt (BRANDHUBER ET AL. 2010). Dafür kamen 6-reihige Zuckerrüben-Köpfrodebunker

zum Einsatz. Untersucht wurden Gefügeveränderungen in der Krumenbasis (30 cm) und im Unterboden (40 cm Tiefe). In der Krumenbasis (30 cm) führten alle drei Varianten zu signifikanten Verringerungen der Luftkapazität (= schnell dränende Grobporen), und nach den Überrollungen (F-Test über alle 3 Jahre) im Unterboden (40 cm) ergab sich nur bei der Radüberrollung mit 13 t Radlast (Variante 2) ein signifikanter Verformungseffekt (Abb. 3.37).

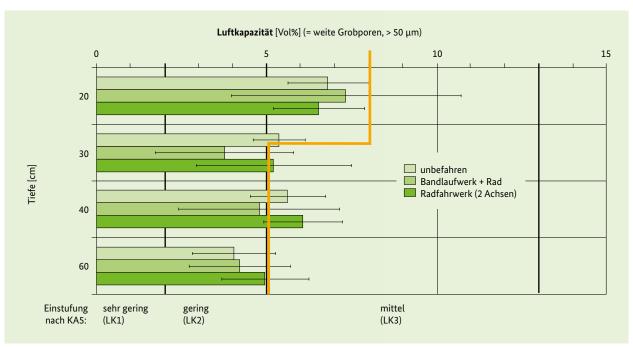


Abb. 3.38: Luftkapazität - Vergleich Bandfahrwerk mit Radfahrwerk beim Köpfrodebunker in 20/30/40/60 cm Tiefe (BRUNOTTE ET AL. 2004)

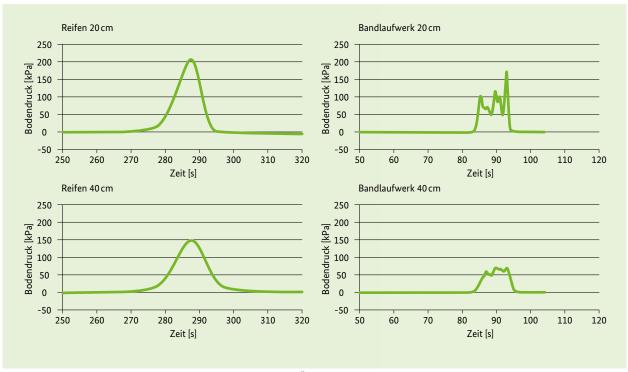


Abb. 3.39: Bodendruck – Vergleich Bandfahrwerk mit Radfahrwerk bei Überrollung durch Köpfrodebunker 6-reih. mit vollem Bunker in 20/40 cm Tiefe. Hinterachse bei ausgehobenem Rodewerkzeug auf feuchtem Boden. Mittelwerte aus jeweils 4 Messungen. (BRUNOTTE ET AL., 2004)

Vergleich Band + Rad mit Rad + Rad: In einem 3-jährigen Feldversuch in Südniedersachsen wurden Fahrwerke von Rübenrodern nach nichtwendender Bodenbearbeitung verglichen: Bandfahrwerk 890 x 2.000 mm + Reifen 900/60 R32; Radfahrwerk: 800/65 R32 + 1050/65 R32. Am Versuchsstandort lagern die Böden kompakt, die Befahrung reduziert die Luftkapazität deshalb kaum (Abb. 3.38, S. 63). In der Krumenbasis gehen die Werte insgesamt weiter zurück. Im Unterboden (40/60 cm) verändert die Befahrung die Luftkapazität nicht weiter.

Vergleich Band (1-mal-Überrollung mit 15 t) mit Rad (1-mal-Überrollung mit 12 t): In Südniedersachsen wurden bei der Zuckerrübenernte auch Bodendruckmessungen durchgeführt (nach 120 mm Niederschlag => Wassergehalt 32 Vol.-%). Zur Zuckerrübe erfolgte eine Mulchsaat mit krumentiefer Lockerung.

Abbildung 3.39, S. 63 zeigt in 20/40 cm Tiefe die Druckspitzen des Hinterrads des Rübenroders (Radlast 12 t), die geringfügig tiefer reichen als die 4 Druckspitzen vom Bandfahrwerk (15 t). Insgesamt ist das Niveau der Bodendrücke in 40 cm Tiefe erheblich reduziert, da die Krumenbasis (30 bis 35 cm Tiefe) die Lasteinträge abpuffert.

Bei der Bewertung von Landmaschinen mit Bandlaufwerken hinsichtlich Bodenschonung ist noch auf zwei Aspekte hinzuweisen:

» Wesentliche Steuerungsgröße für das Risiko von Bodenverdichtungen ist die Bodenfeuchte. Maschinen mit Bandfahrwerken können ihre Arbeit oft noch verrichten, wenn Radfahrwerke wegen hoher Bodenfeuchte nicht mehr vorwärts kommen. Bei derart hoher Bodenfeuchte können aber auch Fahrzeuge mit Bandfahrwerken erhebliche Verdichtungen verursachen. Diese Technik sollte also nicht dafür genutzt werden, die Zeitfenster für die Arbeitserledigung in Richtung höhere Bodenfeuchte auszudehnen oder die Nutzlasten zu erhöhen, sondern den Boden zu schonen.



Abb. 3.40: Silomaisernte, hier mit Feldhäcksler und hinterherfahrendem Häckselgutwagen (Foto: P. Meyer,/BLE)

- Beim Wenden können Maschinen mit Bandfahrwerken in der Krume Strukturschäden durch Verschmieren und Abscheren verursachen. Besonders in kleinstrukturierten Gebieten mit kurzen Schlägen und damit hohem Anteil an Vorgewende kann dies nachteilig sein.
- (3) Akzeptanz des Verfahrens: Landmaschinen mit Bandfahrwerken werden für große Erntemaschinen und in der obersten Leistungsklasse der Traktoren angeboten. Sie sind in der Anschaffung teurer als entsprechende Radfahrzeuge. Ihr Einsatz beschränkt sich deshalb überwiegend auf Fälle, wo diese Maschinen überbetrieblich oder auf Großbetrieben auszulasten sind und technologische oder arbeitswirtschaftliche Vorteile gegeben sind. Bei Mähdreschern der höheren Leistungsklasse mit Tangentialdreschwerk wird oft das Bandfahrwerk ausgewählt, weil bei Rädern zur Abstützung von Vertikallasten > 10 t nur 620er Reifen montiert werden können. In Verbindung mit hohen Reifeninnendrücken (> 3,0 bar) wäre ein bodenschonendes Befahren nur bei trockenen Verhältnissen möglich. Bei Zuckerrübenrodern bestimmt das Rodesystem das Fahrwerk; Reinigungsstrecken, die über die gesamte Arbeitsbreite reichen, fordern eine geringe Bauhöhe, die nur mit dem Bandfahrwerk zu erreichen ist. Großtraktoren, die für schwere Zugarbeiten auf dem Acker eingesetzt werden, dürfen auf der Straße wegen Überschreiten der zulässigen Fahrzeugbreite nicht mit bodenschonenden Zwillings- bzw. Drillingsrädern fahren. Traktoren mit Bandfahrwerken bieten sich hier als Alternative an.

## Beispiel 3: Verfahrensvergleich bei der Silomaisernte - Beitrag zur Bodenschonung anhand der Entscheidungsmatrix

Am Beispiel der Silomais- und Zuckerrübenernte wird die Entscheidungsmatrix zu Beginn ausführlich behandelt. Bei den folgenden Verfahrensketten (Mähdrusch, Kartoffelernte, Gülle- und Gärrestausbringung) erfolgt nur noch eine Kurzbeschreibung des Planungsinstrumentes zu der betreffenden Abbildung.

- (1) Skizze: Die Entscheidungsmatrix (Abb. 3.21, S. 48, Abb. 3.41) ist ein Planungsinstrument für die Investition von Maschinen und für den praktischen Einsatz. Am Beispiel der Silomaisernte werden unterschiedliche Arbeitsketten in ihrem Beitrag zur Bodenschonung anhand bodenphysikalischer und pflanzenbaulicher Parameter eingestuft. Als Belastungsparameter wurden berücksichtigt: Radlast, Kontaktfläche, mittlerer Kontaktflächendruck, Reifeninnendruck, Spurflächenanteil, Überrollhäufigkeit, Schlaglänge und Bodenbearbeitung.
- (2) Nachweis der Wirkung: Die Kontrolle ist immer die unbefahrene Ausgangsvariante, z.B. in der Krumenbasis mit einer Wasserleitfähigkeit von 35 cm/d, also der Stufe "mittel" (s. Abb. 3.31, S. 57, gesättigte Wasserleitfähigkeit). Erfolgt durch die Befahrung mit dem Feldhäcksler + Traktor + Häckselgutwagen eine Minderung in 30 cm Tiefe auf 8 cm/d, so liegt nur noch die Stufe "gering" vor. Die Verknüpfung aller oben genannten Kennwerte ermöglicht eine relativ präzise Einstufung des Verfahrens "Silomaisernte". Das Ergebnis wird mit einer horizontalen Geraden durch das Quadratraster

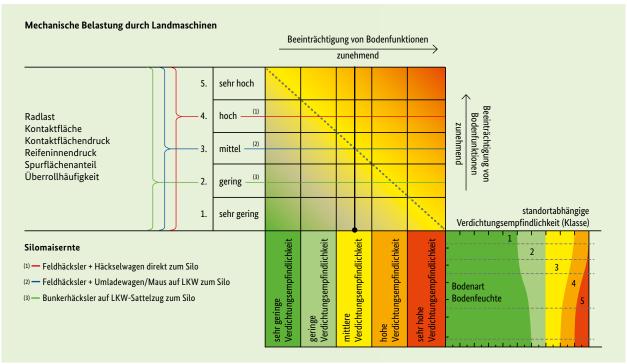


Abb. 3.41: Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Bodenbelastung (Y-Achse) am Beispiel der Silomaisernte (LORENZ ET AL., 2016

gezogen. Der Schnittpunkt mit der standörtlichen Verdichtungsempfindlichkeit erlaubt Aussagen, ob durch die Befahrung Bodenfunktionen gefährdet werden können. Der zu betrachtende Beispielstandort toniger Schluff (Ut3, Lö) mit 700 mm/a Niederschlag und 70 bis 80% Feldkapazität während der Erntezeit, ist in seiner Verdichtungsempfindlichkeit in der Stufe "mittel" einzuordnen (= schwarze vertikale Gerade in Abb. 3.41, S. 65). Die herkömmliche einphasige Verfahrensvariante bei der Silomaisernte ist charakterisiert durch parallel fahrende Transportfahrzeuge, bestehend aus Traktor und Häckselgutwagen. Sie folgen in der Regel der zuvor angelegten Spur des Häckslers. Aufgrund der Überrollhäufigkeit und des auf Straßenfahrt abgestimmten hohen Reifeninnendruckes von > 3 bar, ist die mechanische Belastung als "hoch" einzustufen, u.a. belegt durch die Wasserleitfähigkeit in der Stufe "gering" (s. Abb. 3.31, S. 57). Der Schnittpunkt 1 der durchgezogenen horizontalen Maschinengeraden (rot) mit der vertikalen Standortgeraden liegt im "kritischen" Bereich. Infolgedessen kann die Verfahrensvariante im Mittel der Fälle kaum bodenschonend auf dem skizzierten Standort eingesetzt werden. Ein Befahren im "günstigen" Bereich (Schnittpunkt 2) gelingt nur, wenn die mechanische Belastung in die Stufe "mittel"(blau) verschoben wird. Dazu muss es zu einer Trennung von Feld- und Straßentransport kommen. Dies erlaubt, dass beim Häckselgutwagen der Reifeninnendruck von > 3 bar auf unter 1,5 bar gesenkt werden kann, weil er nur noch auf dem Acker fährt. Das Erntegut wird mittels stationärer oder mobiler Verladestation am Feldrand auf Lkws überladen. Der Einsatz von speziellen, breit bereiften Überladewagen würde die Situation weiter entspannen. Eine weitere Verbesserung der Bodenschonung kann mit einem Bunkerhäcksler erzielt werden, der am Feldrand direkt auf Lkw-Züge überlädt. Der dann erreichte Schnittpunkt 3 (grün) zeigt eine weitere Schonung der Bodenfunktionen an und würde einen Einsatz auch bei zunehmender Feuchte (FK 80 bis 90 %) zulassen. Durch die Hundeganglenkung dieser Technikvariante wird die Überrollung auf 1- bis 2-mal reduziert und es wären Reifeninnendrücke von < 1,5 bar möglich. Voraussetzung ist, dass die Schlaglänge an die Bunkerkapazität angepasst wird (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007; BRUNOTTE ET AL., 2011b).

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Die vorgestellte Entscheidungsmatrix ist ein relativ neues Instrument für die Praxis. Die Herangehensweise erscheint den Praktikern plausibel. Die Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit der eigenen Ackerschläge mit Hilfe der Feldgefügeansprache (s. Abb. 3.49, S. 76) wird in Seminaren und auf Feldtagen gut angenommen. Die Einstufung der Mechanisierungsketten durch wissenschaftliche Untersuchungen und Befahrungsversuche wird in der Praxis geteilt - eigene Messergebnisse für die mechanische Belastung liegen den Landwirten nicht vor. Zukünftig wird es darauf ankommen, Daten zum Standort (Bodenart, Kultur, Witterung => Deutscher Wetterdienst DWD) mit der Planung von Investitionen und dem Maschineneinsatz zu verschneiden, um eine Anpassung der mechanischen Belastung an die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden zu erreichen. Dafür wird zurzeit eine online-Anwendung vom Thünen-Institut, vom DWD und vom KTBL entwickelt, die Landwirte und Lohnunternehmer an ihrem Standort nutzen können.

## Beispiel 4: Verfahrensvergleich bei der Zuckerrübenernte – Beitrag zur Bodenschonung anhand der Entscheidungsmatrix

- (1) Skizze: Anhand der Entscheidungsmatrix werden die typischen Verfahrensvarianten der Zuckerrübenernte bezüglich ihrer mechanischen Belastung eingestuft (Abb. 3.42).
- (2) Nachweis der Wirkung: Anders als bei der Silomaisernte erfolgt die Rübenernte mit 6-reihigen Bunkermaschinen (2-achsig = 22 t, 3-achsig = 30 t Bunkerinhalt) in der Regel ohne parallel fahrende Transportfahrzeuge. Dementsprechend ändert sich das Gesamtgewicht der Erntemaschine mit zunehmender Erntestrecke, die Überrollhäufigkeit bleibt gering (DUTTMANN ET AL., 2013). Zur Steigerung der Flächenleistung und zur Senkung von Rodekosten wird ggf. ein selbstfahrendes Transportfahrzeug bzw. ein Traktor mit Heckkippanhänger eingesetzt. Dadurch werden ca. 30 bis 45 Sekunden Entladezeit bei der Bunkermaschine eingespart. Zu der 1- bis 2-maligen Überrollung der Erntemaschine (2-achsig) kommen auf einem Teil der Produktionsfläche 2 bis 5 Überrollungen und eine Erhöhung des Spurflächenanteils hinzu. Radlasten von 3 bis 12 t + 3 bis 7 Überrollungen stellen eine eher "hohe" mechanische Belastung für den Boden dar. Bodenschonender erfolgt die Zuckerrübenernte, wenn die Schlaglänge der Bunkerkapazität entspricht. So kann ein Ackerschlag von z.B. 500 m Länge durch Hin- und Rückfahrt eines 2-achsigen KRB (700 m eines 3-achsigen KRB) gebunkert und am Vorgewende mit

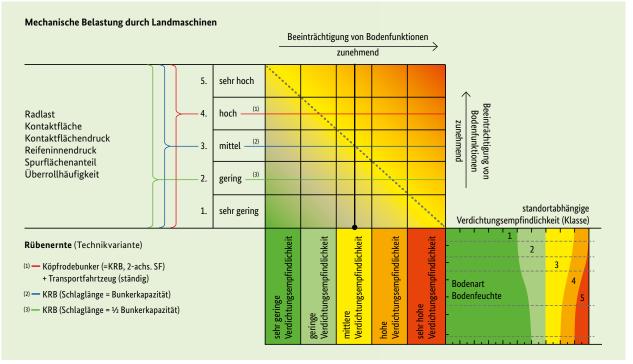


Abb. 3.42: Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Belastung (Y-Achse) am Beispiel der Zuckerrübenernte (LORENZ ET AL., 2016)

Feldweg entleert werden (BRUNOTTE & FRÖBA, 2007). Durch die nur 1- bis 2-malige Überrollung entsteht eine "mittlere" mechanische Belastung. Ist der Grad der Bodenschonung zu erhöhen aufgrund einer gestiegenen Verdichtungsempfindlichkeit (durch zunehmende Bodenfeuchte) des Standortes, kann die Bunkerkapazität nur noch halb ausgeschöpft werden. Das ermöglicht eine Fortsetzung der Ernte mit allerdings geringerer Flächenleistung und erhöhten Kosten.

Durch die verminderte Radlast kann der Reifeninnendruck gemindert (siehe Abb. 3.23, S. 50) und damit das Maß der Bodenschonung erhöht werden. Diese Anpassungsstrategie gelingt nur, wenn die Zuckerrüben an beiden Vorgewenden abgebunkert werden können bzw. der halbe Bunkerinhalt mit einem Transportfahrzeug über Feldwege an die andere Seite transportiert werden

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Die Regel ist das Verfahren "Rübenernte ohne ständiges Transportfahrzeug, allerdings mit Ausschöpfung der Bunkerkapazität". Ein ständiges Transportfahrzeug bleibt die Ausnahme und ist aus Bodenschutzgründen auch nicht zu empfehlen. Das günstigste Verfahren hinsichtlich Bodenschonung findet bisher auch wenig Zustimmung, da die Flächenleistung sinkt und die Transportkosten zunehmen. Eine wichtige Voraussetzung ist die moderate Kampagneauslastung der Maschine, um Tage mit reduzierter Leistung verkraften zu können (siehe Fallbeispiel 1 auf S. 55).

## Beispiel 5: Verfahrensvergleich beim Mähdrusch - Beitrag zur Bodenschonung anhand der Entscheidungsmatrix

Kurzbeschreibung: Insbesondere bei der Mähdruschernte ist eine Beurteilung der Lasteinträge nur innerhalb einer Leistungsklasse sinnvoll. Da Großmähdrescher die höchsten Lasten bedeuten, wurde die Leistungsklasse 9-10 m Arbeitsbreite bei 360 kW zugrunde gelegt. Obwohl in dieser Leistungsklasse am häufigsten Überladewagen auf dem Acker anzutreffen sind, wurden diese nicht berücksichtigt, da nur die Mähdrescher in ihrer Ausstattung betrachtet werden. Wie bei der Rübenernte, bedeutet die Fahrtstrecke mit annähernd gefülltem Korntank die höchste mechanische Belastung für den Acker bei allerdings sehr viel geringerem Spurflächenanteil. Hohe Leistungsklasse fordert eine große, breite Dreschtrommel - liegt sie tangential in der Maschine, verbleibt wenig Platz für großvolumige Bereifung bis zu einer Transportbreite von 3,5 m. Die Tragfähigkeit der relativ schmalen 620er Reifen wird über einen hohen Innendruck von > 3 bar hergestellt. Insbesondere bei feuchter Krume und nach Pflugfurche sind u.a. tiefe Fahrspuren ersichtlich, sodass die mechanische Belastung als "hoch" einzustufen ist (Abb. 3.43, rote Gerade). Bodenschonender sind die folgenden drei Fahrwerke:

Abb. 3.43: Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Belastung (Y-Achse) am Beispiel der Mähdruschernte (LORENZ ET AL., 2016)

- Tangential-Dreschwerke mit Abscheiderotoren erreichen durch die Montage von Zwillingsrädern Reifeninnendrücke von < 2 bar. Da An- und Abbau und Straßentransport (auf einer Halterung vor dem Schrägförderer des Mähdreschers) aufwendig sind, ist der Einsatz nur auf arrondierten Betrieben bzw. auf großen Flächen durchführbar (vgl. Abb. 3.43, blaue Gerade).
- 2. Alternativ werden bei Tangential-Dreschwerken mit Abscheiderotoren Bandlaufwerke eingesetzt, die die Last auf eine große Kontaktfläche abstützen und die maximale Transportbreite auf der Straße einhalten. Allerdings steigt auf jeder Seite die Last um ca. 1,5 t und zusätzlich erhöht sich der Anschaffungspreis.
- Liegt in dieser Leistungsklasse allerdings ein Rotordreschwerk vor, ist bauartbedingt durch längsliegende Druschorgane ausreichend Platz an den Seiten, breite und hohe Reifen zu montieren und aufgrund des hohen Luftvolumens den Innendruck auf unter 2 bar abzusenken.

2) und (3) unterschieden sich hinsichtlich der mechanischen Belastung nur unwesentlich, die bei beiden als gering eingestuft werden kann (vgl. Abb. 3.43, grüne Gerade).

## Beispiel 6: Verfahrensvergleich bei der Kartoffelernte – Beitrag zur Bodenschonung anhand der Entscheidungsmatrix

Kurzbeschreibung: Bei der Kartoffelernte erfolgt der Verfahrensvergleich anhand 2-reihiger Erntetechnik, weil hier eine breite Differenzierung in der Praxis vorzufinden ist. Der Rodelader wird von einem 90 kW Traktor gezogen, der mit schmalen Rädern (300er) zwischen den Dämmen fährt. Ein parallel fahrender Heckkippanhänger nimmt die Kartoffeln auf. Die hohe mechanische Belastung für den Boden ergibt sich aus dem hohen Reifeninnendruck des Traktors vor dem Rodelader, dem an die Straßenfahrt angepassten Innendruck des Heckkippanhängers (> 2,5 bar) und der hohen Überrollhaüfigkeit /Spurflächenanteil beider Fahrzeuge bei einer 2-reihigen Ernte (Abb. 3.44, rote Gerade). Der 2-reihige Bunkerroder ist durch breitere Bereifung und geringeren Innendruck am Traktor und Roder, geringere Überrollhäufigkeit und geringeren Spurflächenanteil hinsichtlich Bodenschonung günstiger als die oben beschriebene Verfahrensvariante zu beurteilen (Abb. 3.44, blaue Gerade). Einen weiteren Vorteil bringt der selbstfahrende 2-reihige Bunkerroder, der durch die 800er Reifen beim Innendruck unter 2 bar liegt und die geringste Überrollhäufigkeit / Spurflächenanteil aufweist (Abb. 3.44, grüne Gerade).

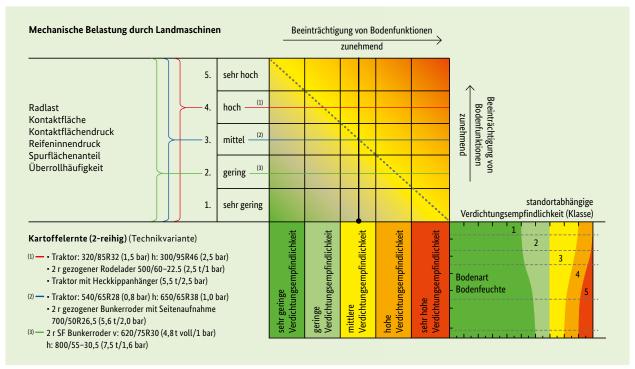


Abb. 3.44: Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X) und mechanischer Belastung (Y) am Beispiel der Kartoffelernte (LORENZ ET AL., 2016)



Abb. 3.45: 2-reihiger Rodelader (Foto: P. Meyer/BLE)

## Beispiel 7: Verfahrensvergleich bei der Gülle-/ Gärsubstratausbringung – Beitrag zur Bodenschonung anhand der Entscheidungsmatrix

Kurzbeschreibung: Bei der Ausbringung organischer Dünger gibt es Parallelen zur Silomaisernte. Wird der Straßen- und Feldtransport ohne Reifendruckverstellanlage von ein und demselben Fahrzeug übernommen (oft bei Eigenmechanisierung gegeben), so kommt es bei Tridem-Gülletankwagen mit > 3 bar Reifeninnendruck durch die hohe Überrollhäufigkeit zu einer "hohen" mechanischen Belastung der Standorte (Abb. 3.46, rote Gerade). Die Gefährdung des Ackers ist

insbesondere dann hoch, wenn im zeitigen Frühjahr bei noch feuchtem Unterboden gefahren wird.

Erfolgt eine Trennung vom Straßen- und Feldtransport und bringt ein selbstfahrender Gülletankwagen mit Hundeganglenkung den organischen Dünger aus, wird die Bodenschonung verbessert (Abb. 3.46, S. 70, blaue Gerade). Obwohl die Radlasten auf > 10t ansteigen, kann durch die nur 1-malige Überrollung und den Reifeninnendruck von max. 2 bar dieses Ergebnis erreicht werden. Ein Selbstfahrer bietet sich zusätzlich an, in einem Arbeitsgang die Einarbeitung der Gülle mit Scheibenegge/ Flachgrubber vorzunehmen.

Abb. 3.46: Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Belastung (Y-Achse) am Beispiel der Gülle-Gärsubstratausbringung (LORENZ ET AL., 2016

Die bodenschonendste Variante ist natürlich die **Gülleverschlauchung**, weil hier nur der Traktor mit 650er Reifen und 0,8 bar Innendruck einen geringen Teil der Fläche zweimal überrollt (Abb. 3.46, grüne Gerade). Durch die geringe mechanische Belastung kann sich das Zeitfenster für die Ausbringung vergrößern und damit erhöht sich der Handlungsspielraum der Landwirte – es stehen mehr Befahrbarkeitstage für eine bodenschonende Ausbringung zur Verfügung.

Diese technischen Lösungen gehen allerdings mit erhöhten Investitionskosten einher. Mit zunehmender Schlaggröße übersteigen die Kosten des Tridem-Pumpentankwagens allerdings die der Gülleverschlauchung – der Gülleselbstfahrer ist immer die günstigste Lösung. Die Gülleverschlauchung stellt durch die notwendige hohe Auslastung eher eine überbetriebliche Alternative dar. Die Forschung ist gefordert den Nutzen aus dem bodenschonenden Befahren zu monetarisieren, um insgesamt eine Akzeptanzsteigerung bei den landwirtschaftlichen Betrieben zu erreichen.

# Beispiel 8: Anpassung des Reifeninnendrucks und Vergrößerung der Kontaktfläche

(1) Skizze: Höhere Tragfähigkeiten von Reifen können durch ein größeres Luftvolumen oder durch einen höheren Reifeninnendruck realisiert werden. Da ein höherer Reifeninnendruck den Boden stärker belastet, werden großvolumige Reifen eingesetzt. Das größere Volumen wird wegen des meist begrenzten Bauraums in erster Linie durch breitere Reifen bei gleichem Reifen- und Felgendurchmesser realisiert. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten weisen sie eine höhere Tragfähigkeit bei gleichem Reifeninnendruck auf. Im Umkehrschluss ermöglichen

diese Reifen bei gleicher Radlast mit deutlich niedrigerem Reifeninnendruck zu fahren. So ist z. B. bei einem Standardreifen 20.8R42 ein Reifeninnendruck von 1,4 bar nötig, um bei 10 km/h eine Radlast von 5.000 kg abzustützen. Wird bei nahezu gleichem Reifendurchmesser ein Breitreifen 710/70R38 eingesetzt, ist nur ein Reifeninnendruck von 0,8 bar erforderlich. Derartige Breitreifen gehören heute bei vielen Traktormodellen zur Grundausstattung (Abb. 3.48).

Mit dem geringen Reifeninnendruck für die Arbeit auf dem Feld ist die Tragfähigkeit für die Straßenfahrt bei hoher Fahrgeschwindigkeit nicht ausreichend. Es ist deshalb eine Anpassung des Reifeninnendrucks vorzunehmen. Als Ergänzung oder Alternative zu breiteren Reifen werden von der Industrie unterschiedliche Möglichkeiten zur Anpassung des Reifeninnendrucks angeboten. Die Angebotspalette reicht von preisgünstigen, einfachen Lösungen mit hohem Arbeits- und Zeitbedarf bis hin zu deutlich teureren Reifeninnendruckverstellanlagen mit hohem Bedienkomfort. Als Einstieg in den variablen Reifendruck kann man mit Schnellkupplern in der Felge Erfahrungen sammeln. Die 4 Schnellkuppler, das Manometer und der Füllschlauch kosten ca. 200 Euro. Für Reifeninnendruck-Verstellanlagen sind bei einem Traktor Mehrkosten von 3.500 bis 12.000 Euro zu erwarten. Für Anhänger ist für die erste Achse mit zusätzlichen Kosten von 3.000 bis 4.000 Euro und für jede weitere Achse mit Kosten von 1.500 bis 2.000 Euro zu rechnen. Besonders für den Anhängerbetrieb mit häufigen Füllvorgängen empfiehlt sich ein Zusatzkompressor, der mit 3.000 bis 6.000 Euro zu Buche schlägt.

(2) Nachweis der Wirkung: Nimmt die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden z. B. nach Niederschlägen zu, ist die mechanische Belastung durch die Maschinen zu

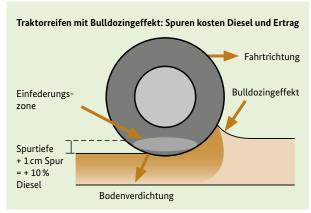


Abb. 3.47: Bulldozingeffekt bedeutet, dass der Reifen im Boden "bergauf" fährt (VOLK 2008, verändert)

reduzieren, um Bodenverdichtungen vorzubeugen. In diesem Fall könnte z.B. bei einer Erntemaschine das Bunkervolumen nur halb ausgeschöpft werden. Der bodenschonende Effekt wird allerdings nur erreicht, wenn der Reifeninnendruck an die verminderte Last angepasst wird.

Ein 1050er Reifen braucht bei einer Last von 12,5 t 2,5 bar Reifeninnendruck und stützt sich auf einer Kontaktfläche von 9 200 cm<sup>2</sup> ab. Bei 9t Last und 2.5 bar werden 20% Kontaktfläche verschenkt und damit das Potenzial des Reifens zur Bodenschonung nicht ausgeschöpft. Inwieweit zukünftig bei Erntemaschinen eine automatische an die Bunkerfüllung angepasste Reifeninnendruckregelung zu erreichen ist, wird die zukünftige Entwicklung zeigen. Dies gelingt nur, wenn eine kontinuierliche Radlastmessung (über die Reifeneinfederung durch Ultraschall) die Bunkerfüllung berücksichtigt und der Reifeninnendruck angepasst wird. Größere Kontaktflächen zwischen Reifen und Boden lassen die Reifen weniger einsinken. Die Spurtiefe bedeutet Bodenverdrängung nach unten und zur Seite und durch Schlupf nach hinten. Gleichzeitig fährt der Traktor bei der Spurbildung mit den Reifen fortwährend gegen einen Erdwall. Dieses kraftzehrende und permanente Bergauffahren im Ackerboden wird Bulldozingeffekt genannt (Abb. 3.47). Kann die Spurtiefe um einen Zentimeter reduziert werden, bedeutet dies etwa 10 % Kraftstoffeinsparung, da zwei Effekte genutzt werden. Einerseits wird der Bulldozingeffekt reduziert und andererseits ist ein geringerer Schlupf zur Zugkrafterzeugung notwendig. Geringerer Schlupf bedeutet auch geringeres "Eingraben" der Räder. Beim Gülleausbringen ab Hof und direktem Einarbeiten mit dem Güllegrubber sind ab etwa 3.000 h Ausbringzeit die Arbeitserledigungskosten beim Einsatz von Breitreifen und einer vom Traktorsitz aus zu betätigenden Reifeninnendruckverstellung geringer, verglichen mit einem Gespann ohne Breitreifen und ohne Reifeninnendruckverstellung. Positive Sekundäreffekte wie beispielsweise bessere Ertragsstabilität und weniger Aufwand bei der Bodenlockerung sind hier noch nicht berücksichtigt.

(3) Akzeptanz der Maßnahme: Großvolumige Reifen sind bei modernen Landmaschinen in der Regel bereits Standard. Einschränkungen gibt es bei Erntemaschinen durch die Beschränkung der Breite für die Fahrt auf öffentlichen Straßen.

Anlagen zur Verstellung des Reifeninnendrucks vom Fahrersitz aus haben besonders bei der Gülleausbringung bereits eine große Verbreitung erreicht. Verstärkt wird die Marktdurchdringung auch für andere Bereiche durch immer weitere Anbieter dieser Technik bei der Erstausrüstung der Maschinen.



Abb.: 3.48: Traktor mit Kraftstoffmessung bei Zugarbeiten mit verschiedenen Reifeninnendrücken (Foto: L. Volk)

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung – 5. Auflage; Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S.

ANSORGE, D. & GODWIN, R. J. (2007): Raupen und Reifen. Landtechnik 62 (1), 30–31.

ARVIDSSON, J., TRAUTNER, A., VAN DEN AKKER, J. J. H., SCHJØNNING, P. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestors in southern Sweden. II Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. Soil Tillage Research 60, 79–89.

BECKER, B. & TIEDEMANN, M. (2012): Bundes-Bodenschutzgesetz. Kommentar – Stand 4.2012. 1 Ordner, z. Zt. ca. 1.800 Seiten; Loseblattwerke RS Schulz Verlag.

BEYLICH, A., OBERHOLZER, H.-R., SCHRADER, S., HÖPER, H. & WILKE, B.-M. (2010): Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. Soil and Tillage Research 109, S. 133–143.

BISCHOFF, J. (2011): Langzeitversuch auf Löß-Schwarzerde. Landwirtschaft ohne Pflug H 5, S. 34–39.

BMJ-BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ (1999): Bundes-Bodenschutzund Altlastenverordnung (BBodSchV) (BGBl. I S. 1.554).

BMU-BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG), Bundesgesetzblatt I 1998, 502, FNA 2129, GESTA NO 18. 2004.12.09.

BOLLING, I. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – neue Meß- und Rechenmethoden. München, Forschungsbericht Agrartechnik, Arbeitskreis Forschung und Lehre Max-Eyth-Ges. (133), 274 S. BOLLING, I. & SÖHNE, W. (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. Landtechnik 37, 2, S. 54–57.

BRANDHUBER, R. (2005): Bodengefüge – Status und Veränderungen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 8, S. 57–60.\*

BRANDHUBER R, DEMMEL, M., KOCH, H-J. & BRUNOTTE, J. (2008): Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen – Empfehlungen für die Praxis. DLG-Merkblatt 344:19 p.

BRANDHUBER, R., DEMMEL, M. & GEISCHEDER, R. (2010): Bodengefügeschutz mit optimierter Fahrwerkstechnik. Schriftenreihe des LfULG, Heft 15/2010, S. 38–45.

BRUNOTTE, J. (2013): Bodenschonendes Befahren bei der Silomaisernte. In: Logistik rund um die Biogasanlage, KTBL-Schrift 490, Darmstadt, S. 49–62

BRUNOTTE, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off, und Mykotoxinbildung im Getreide. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 305, ISBN 978-3-86576-029-6, 159 S.

BRUNOTTE, J. (2008): Messungen der aktuellen Befahrbarkeit durch online-Sensoren – eine Lösung für die Praxis? In: Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf. Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ilu), H 15, S. 101–110, ISBN3- 926898-29-1.

BRUNOTTE, J. (2012): Anpassung der mechanischen Belastung an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. In: Management der Ressource Wasser, KTBL-Schrift 492, S. 107–116.\*

BRUNOTTE, J. & FRÖBA, N. (2007): Schlaggestaltung – kostensenkend und bodenschonend. KTBL-Schrift 460, 178 S.\* BRUNOTTE, J., WEISSBACH, M., RO-GASIK, H., ISENSEE, E. & SOMMER, C. (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrübenerntetechnik. Zuckerrübe 49 (1), S. 34–40.\*

BRUNOTTE, J. & WAGNER, M. (2001): Bodenschonung und Kosteneinsparung. KTBL-Schrift 266, 117 S.\*

BRUNOTTE, J., LORENZ, M., NOLTING, K., VOSSHENRICH, H.- H. & SOMMER, C. (2004): Entwicklung eines Befahrbarkeitssensors – Einfluss unterschiedlicher Fahrwerksausstattungen am Rübenroder auf Bodendruck und Bodenstruktur. Jahresbericht FAL 2004, S. 125.

BRUNOTTE, J., SOMMER, C., ISENSEE, E. & WEISSKOPF, P. (2005): Der Boden unter Druck. Landtechnik 60 (3), S. 150–151.\*

BRUNOTTE, J., LORENZ, M., NOLTING, K., VOSSHENRICH, H.- H. & SOMMER, C. (2006): Entwicklung eines Befahrbarkeitssensors. Jahresbericht der FAL, S. 51.

BRUNOTTE, J., NOLTING, K., LORENZ, M., SOMMER, C. & ISENSEE, E. (2007b): Befahrbarkeitssensor – Flexibles Einsatzmanagement und Bodenschonung während der Ernte. Zuckerrübe 56 (5), S. 246–249.\*

BRUNOTTE, J., LORENZ, M., SOM-MER, C., HARRACH, T. & SCHÄFER, W. (2008): Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. Berichte über Landwirtschaft 86 (2), S. 262–283.\*

BRUNOTTE, J., VORDERBRÜGGE, T., NOLTING, K. & SOMMER, C. (2011a): 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 IV: Ein

praxisorientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. Landbauforsch 61 (1), S. 51-74.\*

BRUNOTTE, J., DEMMEL, M., FRÖBA, N., UPPENKAMP, N. & WEISS-BACH, M. (2011b): Boden schonen und Kosten senken. KTBL-Heft 89, Darmstadt, 64 S.\*

BRUNOTTE, J., SENGER, M., VON HAAREN, M., HEYN, J., BRANDHU-BER, R., VOSSHENRICH, H., EPPER-LEIN, J., VORDERBRÜGGE, T. ORTMEI-ER, B. & LORENZ, M. (2011c): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. Braunschweig, vTI, Tafel, 3. Auflage.

BRUNOTTE, J., NOLTING, K., FRÖBA, N. & ORTMEIER, B. (2012): Bodenschutz beim Pflügen: Wie hoch ist die Radlast am Furchenrad? Landtechnik 67 (H 4), S. 265-269.

BRUNOTTE, J. & ORTMEIER, B. (2012): Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Belastung (Y-Achse) an verschiedenen Beispielen. Unveröffentlicht. Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Braunschweig.

CHAMEN, T. (2006): Controlled traffic farming. Literaturreview and appraisal of potential use in the U.K., HGCA Research Review, London, 59 S.

CHAMEN, W. T. C., ALAKUKKU, L., PIRES, S., SOMMER, C., SPOOR, G., TI-JINK, F. G. J. & WEISSKOPF, P. (2003): Prevention strategies for field trafficinduced subsoil compaction: A Review. Part 2. Equipment and field practices. Soil und Tillage Research 73, S. 161–174.

CRAMER, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Bonner Bodenkundl. Abhandlungen, 44, 198 S.

DANFORS, B. (1974): Packning i alven. Special-meddelande/Jordbrukstkniska institutet 24.

DEMMEL, M. BRANDHUBER, R. & WILD, M. (2010): Wie viel schaden Verdichtungen? Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 11/12, S. 17-22.

DIEZ, TH. (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld: Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. Berichte über Landwirtschaft, SH 204, S. 96-103.

DIEZ, TH. & WEIGELT, H. (2000): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising-München. DIN 19682-10 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Deutsches Institut für Normung, DIN 19682-10. Beuth, Berlin.

DISERENS, E. (2002): Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. FAT Nr. 582, 11 S.

DISERENS, E. & SPIESS, E. (2005): TASC - eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. Agrarforschung 12 (1), S. 22-27.

DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation, Gießener Bodenkundliche Abhandlungen Bd. 3, 236 S.\*

DÜRR, H.-J., PETELKAU, H. & SOM-MER, C. (1995) Literaturstudie "Bodenverdichtung". UBA-Texte 55/95, 203 S.

DUTTMANN, R., BRUNOTTE, J. & BACH, M. (2103): Evaluierung der schlagintensiven Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen für den Praktiker. Landbauforschung (63) S. 171-189

EPPERLEIN, J. & JOSCHKO, M. (2002): Population von Regenwürmern nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung und vor/ nach Befahren mit Zuckerrüben-Vollerntern. Schriftliche Mitteilung, Berlin.\*

FRERICHS, L. (2004): Lehrblätter zur Vorlesung Agrartechnik I. RWTH Aachen. FRÖBA, N. (2012): schriftliche Mitteilung, KTBL Darmstadt.

FRÖHLICH, O. K. (1934): Druckverteilung im Baugrunde. Springer- Verlag, Wien.

GEISCHEDER, R. (2011): Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Dissertation TU München. http://d-nb.info/1016035055/34

GEISCHEDER, R., BRANDHUBER, R. & DEMMEL, M. (2007): Wirkung verschiedener Fahrwerke auf die Bodenstruktur bei gleichem Kontaktflächendruck. Landtechnik 62, S. 268-269.

GRUBER, W. (1993): Befahrbarkeit von Ackerböden. KTBL-Arbeitspapier 190, S. 52-58.

HARRACH, T. (2011): Schutz der Ackerböden vor Verdichtung und Erosion durch reduzierte Bodenbearbeitung und Förderung der Regenwurmaktivität - Mit Grundzügen eines Leitbildes "Anzustrebendes Bodengefüge". Bodenschutz, H. 2, S. 49-53.

HARRACH, T. & VORDERBRÜGGE, T. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Berichte über Landwirtschaft 204, S. 69-82.\*

HARRACH, T., HEYN, J., VORDER-BRÜGGE, T. & SCHNEIDER, M. (2012): Angepasste Bodenbearbeitung, Förderung der Regenwurmaktivität und anzustrebendes Bodengefüge zum Schutz der Ackerböden vor Verdichtung und Erosion. Heft 05/12 Fachinformationen Pflanzenproduktion, LLH Hessen, ISSN 1610-6873, 22 S.

HOLPP, M., ANKEN, T. & HENSEL, O. (2011): Satelliten bringen Luft in Direktsaatböden. Landwirtschaft ohne Pflug, Heft 5, S. 28-33.

ISENSEE, E., WEISSBACH, M., SOM-MER, C. & BRUNOTTE, J. (2001): Bodenschonung mit moderner Technik -Grundlagen und Empfehlungen. DLG/ KTBL-Arbeitsunterlagen B/2001, 30 S.\*



JÉGOU, D., BRUNOTTE, J., ROGA-SIK, H., CAPOWIEZ, Y., DIESTEL, H., SCHRADER, S. &, CLU-ZEAU, D. (2001): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. European Journal of Soil Biology 38, S. 329–336.\*

KOCH, H.-J, BRANDHUBER, R., STOCKFISCH, N. & SCHÄFERLANDE-FELD, L. (2002): Bodenschutz bei Zuckerrübenernte und Gülleausbringung. Zuckerrübe 1, S. 34–37.

KTBL-KURATORIUM FÜR TECH-NIK UND BAUWESEN IN DER LAND-WIRTSCHAFT (2014a): Bodenbearbeitungs- und Bestellsysteme. https://www.ktbl.de/fileadmin/user\_ upload/artikel/ Pflanzenbau/Bodenbearbeitung/Uebersicht-Bodenbearbeitungund-Bestellsysteme.pdf. (Die Seite ist nicht mehr aufrufbar)

KTBL-KURATORIUM FÜR TECH-NIK UND BAUWESEN IN DER LAND-WIRTSCHAFT (2014b): Definitionen zu Mulchen, Häckseln, Schreddern, Schröpfen und Schlegeln. https://www.ktbl. de/fileadmin/user\_ upload/artikel/Pflanzenbau/Mulchen/ Definition\_ Mulchen\_Haeckseln.pdf. Zugriff am 30.10.2014

KTBL-KURATORIUM FÜR TECH-NIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für Gute fachliche Praxis. Arbeitspapier 266, 130 S.

KTBL-KURATORIUM FÜR TECH-NIK UND BAUWESEN IN DER LAND-WIRTSCHAFT (2012): Management der Ressource Wasser. KTBL-Schrift 492, 156 S.

KTBL-KURATORIUM FÜR TECH-NIK UND BAUWESEN IN DER LAND-WIRTSCHAFT (2014c): KTBL – Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15, Darmstadt. LAMANDÉ, M. & SCHJØNNING, P. (2011a): Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. Soil and Tillage Research, Volume 114, Issue 2, S. 57–70.

LAMANDÉ, M. & SCHJONNING, P. (2011b): Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. Soil and Tillage Research 114, S. 71–77.

LEBERT, M. (2010): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. UBA-Texte, 51/10, ISSN 1862-4804, 96 S.

LEBERT, M., BRUNOTTE, J. & SOM-MER, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden – Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA-Texte 46/04, ISSN 0722-186 X, 122 S.

LI, Y. X., TULLBERG, J. N., FREEBAIRN, D. M. & CIESIOLKA, C. A. (2004): Effect of controlled traffic and conservation tillage on runoff and crop yield. Paper number 041071, 2004 ASAE Annual Meeting.

LORENZ, M., BRUNOTTE, J., VOR-DERBRÜGGE, T., BRANDHUBER, R., KOCH, H.-J., SENGER, M. FRÖBA, N. und LÖPMEIER, F.-J. (2016). Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland. Landbauforschung Applied Agricultural and Forestry Research 66(2), 101-143, DOI: 10.3220/LBF1473334823000.

NOLTING, K. (2006): Bodensetzung unter 6-reihigem Köpfrodebunker bei unterschiedlicher Bunkerfüllung (nach Pflugfurche zu Rüben), schriftliche Mitteilung. NOLTING, K., BRUNOTTE, J., LORENZ, M. & SOMMER, C. (2005): Entwicklung eines Online-Sensorsystems zur Erkennung der aktuellen Befahrbarkeit von Ackerböden. BMBF-Projekt 03300316. Projektbericht 2006, 30 S.\*

NOLTING, K., BRUNOTTE, J., LORENZ, M. & SOMMER, C. (2006): Bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. Landtechnik 61 (4), S. 190–191.\*

OLFE, G. (1990): Schlepperausstattung und Schlepperverwendung in der Landwirtschaft bei unterschiedlichen betrieblichen Verhältnissen. München-Weihenstephan: Selbstverl, XII, 216 p, München, Technische Univ, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, Diss, Forschungsber Agrartechn Arbeitskr Forsch Lehre MEG 195.

RENIUS, K. T. (1987): Traktoren. Technik und ihre Anwendung, München, RIV

ROGASIK, H., JOSCHKO, M. & BRU-NOTTE, J. (1994): Nutzung der Röntgen-Computertomographie zum Nachweis von Gefügeveränderungen durch Mulchsaat. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 73, S. 111–114.\*

RUHM, E. (1983): Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung (4), S. 3–4.

SCHÄFER, W. (2011): Bodenverdichtung – Gefährdung der Funktionen des Bodengefüges. Tagung vom 5.–6.12.2011 des LBEG in Hannover, "20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen".

SCHÄFER-LANDEFELD, L., & BRAND-HUBER, R. (2001): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – ein tragfähiges Konzept? Bodenschutz 2, S. 48–52.\*

SCHRADER, S. (2001): Ackerboden als Nutz- und Schutzgut aus ökologischer Sicht. Wasser und Boden 53, S. 4–8. SEMMEL; H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalischmechanische Kenngrößen auf Ackerböden. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 26. Universität Kiel.

SÖHNE, W. (1953): Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik 5, S. 49-63.

SOMMER, C. (1974): Die Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden ein Beitrag zum Verhalten von Böden unter vertikaler Belastung im Saugspannungsbereich bis pF 2.7. Diss. TU Braunschweig, Landbauforschung Völkenrode SH 26.

SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Landtechnik 40 (9), S. 378-384.

SOMMER, C. (1998a): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz 1, S. 12-16.

SOMMER, C. (1998b): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. Habilitation, Braunschweig/ Kassel. Landbauforschung Völkenerode, SH 191.\*

SOMMER, C. & HARTGE, K.-H. (1991): Verdichtung und Befahrbarkeit von Böden. Ber. über Landwirtschaft, 204. Sonderheft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 2: Bodengefüge, S. 104-117.

SOMMER, C., BRANDHUBER, R., BRU-NOTTE, J. & BUCHNER, W. (2001a): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. Bund- Länder Papier, BMVEL Bonn, S. 14-41.\*

SOMMER, C., BRUNOTTE, J. & ORT-MEIER, B. (2001b): Bodenverdichtung -Felduntersuchungen zu Lösungsansätzen. Zuckerrübe 6, S. 364-371.\*

SOMMER, C. & BRUNOTTE, J. (2003): Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. Landnutzung und Landentwicklung 44, H 5, S. 220-228.

STAHL, H., MARSCHALL. K. & GÖT-ZE, H. (2005): Bodendruck und Bodenbelastung – Abschlussbericht zum Projekt "Risikomanagement Bodengefüge". Schriftenreihe Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft 10 (15),

TEBRÜGGE, F. (1988): Bodenbearbeitungssysteme im Vergleich. Landtechnik 43 (9), S. 364-366.

TIJINK, F. G. J. & SPOOR, G. (2004): Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. Zuckerindustrie 129 (9), S. 647-652.

TOP AGRAR - Hrsg. (2010): Unser Boden - begehrt - zerstört - beschützt. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster Hiltrup, 42 S.

TULLBERG, J. (2001): Controlled traffic for sustainable cropping. Proceedings of the 10th Australian Conference, 28.01.-01.02.2001, Hobart, Tasmania.

VOLK, L. (2008): Diesel sparen beim Fahren. In: Neue Landwirtschaft. Januar 2008, S.48-52

VAN CAPELLE, C., SCHRADER, S. & BRUNOTTE, J. (2012a): Tillage- induced changes in the functional diversity of soil biota - A review with a focus on German data. European Journal of Soil Biology 50, S. 165-181.

VAN CAPELLE, C., SCHRADER, S. & BRUNOTTE, J. (2012b): Bodenleben erhalten und fördern - Bodenbearbeitungsintensität steuert die funktionelle Vielfalt der Bodenorganismen. Landwirtschaft ohne Pflug 1/2 2012, S. 17-22.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2014): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtlinie 6101, Düsseldorf, 68 S.

VORDERBRÜGGE, T. (2004): Vorschlag zur Ableitung von Bodenwerten für die Beurteilung von Bodenschadverdichtungen gemäß den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bodenschutz 2/04, S. 44-52.\*

VORDERBRÜGGE, T. & BRUNOTTE, J. (2011): 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. Landbauforschung Vol. 61, No. 1 03.2011, 74 S.

WEISSBACH, M. (1994): Wirkung von Fahrwerken auf den Boden, insbesondere im Grenzbereich Boden/Pflanze. Dissertation, Universität Kiel, 227 S.\*

WEISSBACH, M. (2003): Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Habilitation, Universität Kiel, ISBN 3-8325-0518-0, 197 S.\*

WEYER, T. & BOEDDINGHAUS, R. (2009): Bodenverdichtung vermeiden -Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen. Ministerium für Umwelt und Naturs chutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Referat Öffentlichkeitsarbeit, Düsseldorf.

WILDE, TH. (1999): Regeneration von Ackerböden nach starker landtechnischer Belastung. Dissertation, Universität Kiel, 169 S.\*

\* Weiterführende Literatur zur Entscheidungsmatrix "Anpassung vom Maschineneinsatz an die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit".



Abb. 3.49: Die einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker ist ein Instrument der Betriebsführung, mit dem langfristig Veränderungen an der Bodenstruktur festgestellt bzw. kritische Befahrungszustände analysiert werden können. Nur so gelingt die Anpassung der Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden im Sinne Guter fachlicher Praxis.



## Impressum

3614/2022

### Herausgeberin

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) Präsident: Dr. Hanns-Christoph Eiden

Deichmanns Aue 29

53179 Bonn

Telefon: +49 (0)228 6845-0

Internet: www.ble.de, www.landwirtschaft.de,

www.praxis-agrar.de

#### Redaktion

Dr. Volker Bräutigam Rainer Schretzmann Wilfried Henke (i. R.) alle Bundesinformationszentrum Landwirtschaft in der BLE, Referat 412 – Fachkommunikation, Bundeszentrum Weidetiere und Wolf

#### Text

Kapitel 1: H. Honecker, M. List, Caroline Hendrischke, Marion Senger Kapitel 2: Th. Vorderbrügge, M. Busch, R. Brandhuber, J. Bug, S. Schrader, Th. Weyer Kapitel 3: J. Brunotte, R. Brandhuber, Th. Vorderbrügge, S. Schrader Kapitel 4.1 Winderosion: M. Busch Kapitel 4.2 Wassererosion: W. Schmidt, R. Brandhuber, J. Bug

## Gestaltung

Arnout van Son, Alfter

### Titelbild

Joachim Brunotte

Umschlagseite hinten:

© Krzysztof – stock.adobe.com: U4 © rightdx – stock.adobe.com: U4 © Countrypixel – stock.adobe.com: U4

© Kletr - stock.adobe.com: U4

### Druck

Kunst-und Werbedruck GmbH & Co. KG, Hinterm Schloss 11, 32549 Bad Oeynhausen

Das Papier besteht zu 100% aus Recyclingpapier.

Nachdruck und Vervielfältigung – auch auszugsweise – sowie Weitergabe mit Zusätzen, Aufdrucken oder Aufklebern nur mit Zustimmung der BLE gestattet.

Stand September 2022 © BLE 2022

### Bestellungen an:

BLE-Medienservice c/o IBRo Versandservice GmbH Kastanienweg 1 18184 Roggentin Telefon: +49 (0)38204 66544 Telefax: +49 (0)228 8499-200 bestellung@ble-medienservice.de

Alle Medien auch als Download: www.ble-medienservice.de