

Gerhard Moitzi - Josef Boxberger

Vermeidung von Bodenschadverdichtungen beim Einsatz von schweren Landmaschinen – eine aktuelle Herausforderung

Das historisch angespannte Verhältnis zwischen Maschine und Boden gewinnt angesichts der erreichten Maschinenmassen und deren Belastungsfaktoren für den Boden erneut an Bedeutung. Wissenschaft und Praxis versuchen die Frage zu klären, ob der durch den Einsatz von Landmaschinen in der Feldarbeit verursachte Bodendruck die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt.

Seit 1995 müssen alle landwirtschaftlichen Flächen im guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand erhalten werden. Im Sinne des vorsorglichen Bodenschutzes ist in der Cross-Compliance-Bestimmung „Maschineneinsatz bei Bodenbearbeitung“ die Bodenbearbeitung von landwirtschaftlichen Nutzflächen nicht zulässig, wenn die Böden durchfrozen, wassergesättigt, überschwemmt sind oder eine geschlossene Schneedecke aufweisen (AMA, 2007).

Im diesem Beitrag werden Auswirkungen von schweren Maschinen auf den Boden sowie landtechnische Möglichkeiten sowie zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen aufgezeigt.

Begriffbestimmungen:

- **Bodenbelastung:**

Mechanische Belastung als Gewichtskraft oder als Kontaktflächendruck

- **Bodenbeanspruchung (= Bodendruck):**

Auftretenden Druck- und Schubspannungen (in vertikaler und horizontaler Richtung) während des Befahrens

- **Bodenverdichtung:**

Funktionale Änderung des Porensystems (Gefügeveränderung)

- **Bodenschadverdichtung:**

Jene Bodenverdichtung, deren Gefügeveränderung negative Auswirkungen auf die Produktionsfunktion, die Regelungsfunktion (Infiltration, Stoffverlagerung) und Lebensraumfunktion (Bodentiere) des Bodens hat. Folgende Einflussfaktoren bedingen eine potenzielle Bodenschadverdichtung:

- eingesetzte Maschine
- Standort (aktuelle Bodenfeuchte, Bodenart)
- Zeitpunkt des Befahrens
- Art der Bodenbearbeitung

1. Historie zur Erkenntnis der Auswirkungen von Maschinen

In den Anfängen der Motorisierung in der Außenwirtschaft wurden der sog. Dampfbockkultur (Kippflug wurde vom Feldrand aus mittels eines Dampflokomoils über eine Seilzugtechnik über das Feld gezogen) eine geringere Bodenbelastung im Vergleich zu den nachteiligen Effekten der Hufe von Zugtieren zugeschrieben (KÖNIG, 1988). Dabei wurde die schwere Bodenbelastung der Dampflokomoile am Feldrand lokalisiert. Mit der Einführung der Traktoren (20iger Jahre) begann auch die Sorge um die Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit.

Die Nachteile der Eisenräder bei den ersten Traktoren (hoher Rollwiderstand, schlechte Eignung für die Straßenfahrt, bedingt einsetzbar auf Sandböden) versuchte man durch die Gummibereifung zu minimieren. Das Triumvirat EHLERS, PREUSCHEN & KOENECKE begann in Europa mit der Erforschung der Auswirkungen der Gummibereifung von Traktoren auf den Boden. Dabei stand Ihnen als Analysenobjekt die Kontaktfläche („Adhäsions-Ellipse“) zwischen Reifen und Boden zur Verfügung. Bei einem höheren Reifendruck wird die Adhäsions-Ellipse kleiner und man verschenkt dadurch effektiv vorhandene Zugkraft. Die damaligen Bodenkundler GÖRBING und SEKERA haben aber auf die etwaige Gefahr einer Bodenverdichtung hingewiesen und Gegenmaßnahmen (z.B. Verwendung von Untergrundlockerungsscharen) empfohlen (SIMBRIGER, 1981).

Weitere grundlegende Untersuchungen zur Bodenmechanik beim Befahren und Bearbeiten der Böden erfolgten in den 50er Jahren durch PROF. SÖHNE an der Forschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig-Völkenrode, in denen folgende allgemeine Aussagen abgeleitet wurden:

1. Die Verdichtung in den **oberen Schichten** ist hauptsächlich eine Funktion des **Kontaktflächendrucks**, die Verdichtung in den **unteren Schichten** ist hauptsächlich von den **Radlasten** abhängig.
2. Die Verdichtungsgefahr ist bei einem bestimmten Kontaktflächendruck unter praktischen Bedingungen in **feuchten Böden höher als in trockenen**.
3. Ein geringer Kontaktflächendruck erfordert **breitere Reifen** mit **einem geringen Reifeninnendruck**

2. Wirkungsmechanismus Fahrzeug - Boden

Über die Kontaktfläche Rad-Boden werden vom Fahrzeug ausgehende Kräfte in den Boden eingeleitet (Abbildung 1): Gewichtskraft als Vertikalkraft, Trieb- Brems und auch Lenkkräfte als Horizontalkräfte und bei gezogenem Rad Zugkräfte (BRANDHUBER, 2006).

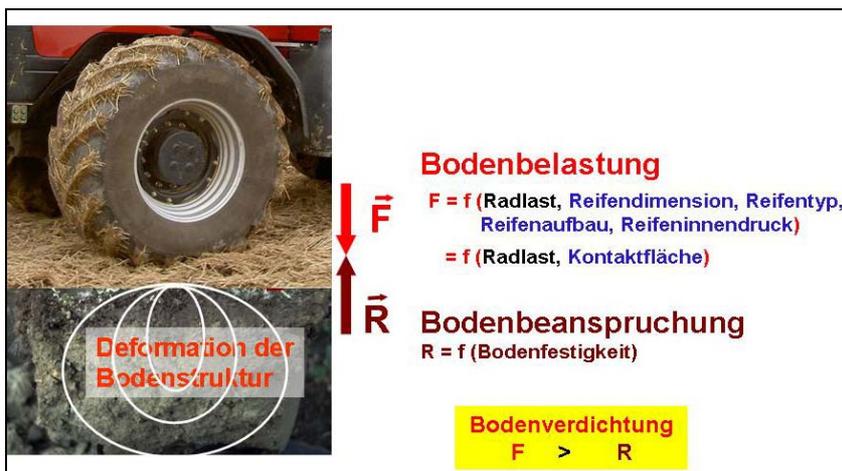


Abbildung 1: Wirkmechanismus Bodenbelastung – Bodenbeanspruchung.

Die notwendige Tragfähigkeit des Bodens wird im Wesentlichen durch die Kontaktpunkte zwischen den Bodenteilchen sowie die Wasserspannung in den Menisken in Poren hergestellt (Abbildung 2).

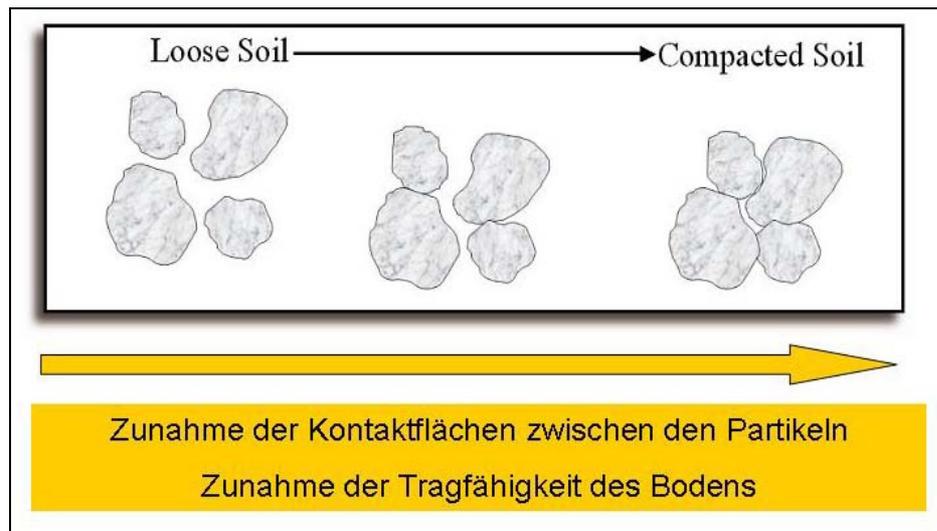


Abbildung 2: Folge von Bodenverdichtungen auf der Partikelebene

Ein wissenschaftlich anerkanntes Stabilitätsmaß zur Charakterisierung der Bodenstabilität ist die sog. **Vorbelastung**. Diese gibt den höchstmöglichen Belastungswert an, bis zu dem der ungesättigte, strukturierte Boden nicht irreversibel bzw. bleibend verformt wird. Es ist der Grenzwert zwischen plastischer und elastischer Verformung. Die Vorbelastung verhält sich umgekehrt proportional zur Verdichtungsempfindlichkeit (DIN 2001). Nach dem Konzept der Vorbelastung erfolgt auch im softwaregestützten Programm TASC die Beurteilung für potentielle Schadverdichtungsgefährdung. TASC steht für **Tyres/Track And Soil Compaction** und wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Tänikon (FAT) entwickelt und ist auch dort erhältlich. Für unterschiedliche Bodenarten wurden in TASC näherungsweise Vorbelastungswerte (dargestellt als Stabilitätspunkt) ermittelt (Tabelle 1). Im Wesentlichen wird die Tragkraft des Bodens durch die Bodenfeuchte, Lockerungsgrad und Bodenart bestimmt. Allgemein ist tonreicher Boden bei Feldkapazität weniger tragfähig als ein leichter Boden.

Tabelle 1: Grenzbereiche des Stabilitätspunktes bei Feldkapazität* (pF 1,8) je nach Bodenart mit Einstufung der Schadverdichtungsgefahr (TASC, 2005)

Bodenart	Stabilitätspunkt im Grenzbereich [bar]	Vertrauensintervall [bar]	Schadverdichtungsgefahr bei pF 1,8	
Tonreiche Böden IT, T	0,80	± 0,10	sehr gering gering mäßig groß	< 0,70 0,70 – 0,80 0,80 – 0,90 >0,90

Schluffreiche Böden tU, IU, sU, U	1,05	± 0,15	sehr gering gering mäßig groß	< 0,90 0,90 – 1,05 1,05 – 1,20 > 1,20
Toniger Lehm und Lehm tL, L	0,85	± 0,10	sehr gering gering mäßig groß	< ,075 0,75 – 0,85 0,85 – 0,95 >0,95
Sandiger Lehm, lehmreiche Sandböden sL, IS	1,05	± 0,15	sehr gering gering mäßig groß	< 0,90 0,90 – 1,05 1,05 – 1,20 > 1,20
Sandreiche Böden uS, S	1,20	± 0,20	sehr gering gering mäßig groß	< 1,00 1,00 – 1,20 1,20 – 1,40 >1,40

*Feldkapazität: Saugspannung des Bodenwassers, die 2 – 3 Tage nach einer vollständigen Sättigung und anschließendem Entwässern durch die Gravitationskraft auftritt. d.h. Grobporen sind entwässert.

Die Bodenfeuchte gilt in unserem Klimaraum als Steuerungsgröße der Verdichtungsempfindlichkeit (BRANDHUBER, 2006). Hinsichtlich des Bodengefügeschutzes ist das Warten auf bessere Befahrbarkeit ein wirksames Mittel. Zum Ausgleich muss aber eventuell eine höhere Flächenleistung („Schlagkraft“) zur Verfügung stehen.

3. Folgewirkungen von Bodenverdichtungen

Technikbedingte Bodenverdichtungen führen zur Verringerung des Porenvolumens und lassen sich durch qualitative und quantitative Indikatoren beschreiben (HORN, 2005 leicht verändert):

Qualitative Indikatoren	Quantitative Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> • Verändertes Wachstum des Pflanzenbestandes • Ertragsdepressionen, erhöhte Ertragsunsicherheit • Ausgeprägte Plattenbildung • Spurenrillenbildung • Erosion • Erhöhter Zugkraftbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Porengrößenverteilung • Hydraulische Leitfähigkeit • Luftpermeabilität • Wurzelwachstum • Denitrifikation – Redoxpotenzial • Eindringwiderstand

Das Makroporensystem (insbesondere der Anteil der Grob- und Mittelporen) wird durch den Einsatz von schweren Maschinen verändert (Abbildung 3). In der Krumentiefe können die Verdichtungen durch die Bodenbearbeitung mechanisch rückgängig gemacht werden.

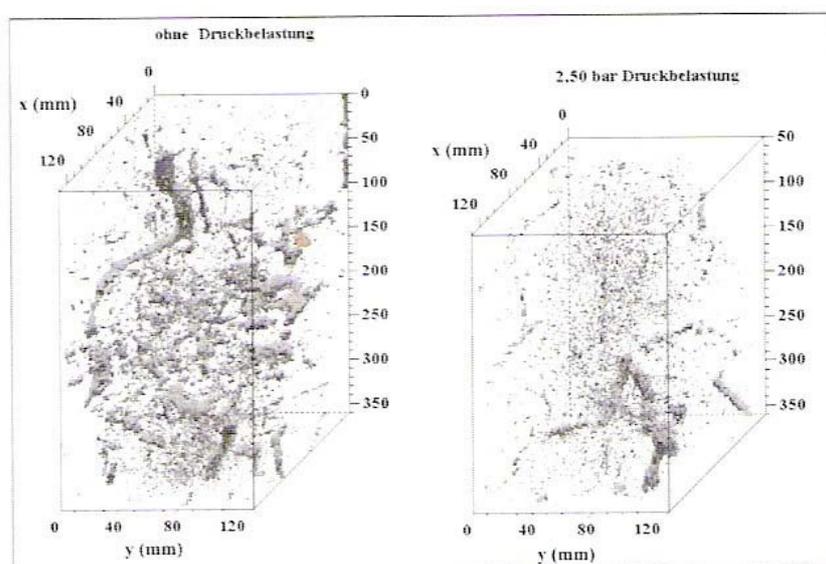


Abbildung 3: 3-Dimensionale Darstellung des Makroporensystems ohne und mit Druckbelastung (Bildquelle: BRUNOTTE ET AL. in VDI-Richtlinie 6101)

Problematisch hingegen sind Schadverdichtungen im Unterboden, da hier die **Reparaturmaßnahmen** (mechanisch und biologisch) noch aufwendiger durchzuführen sind und einen längere Zeit in Anspruch nehmen. Bedingt durch den höheren Wassergehalt im Unterboden sind mechanische Lockerungsmaßnahmen strukturschädigend (HORN, 2006).

Die Wiederherstellung einer aggregierten Bodenstruktur erfordert zudem den Anbau von meliorativen Kulturpflanzen (z.B. Kreuzblütlern), die mit ihrem Wurzelsystem in den Unterboden reichen.

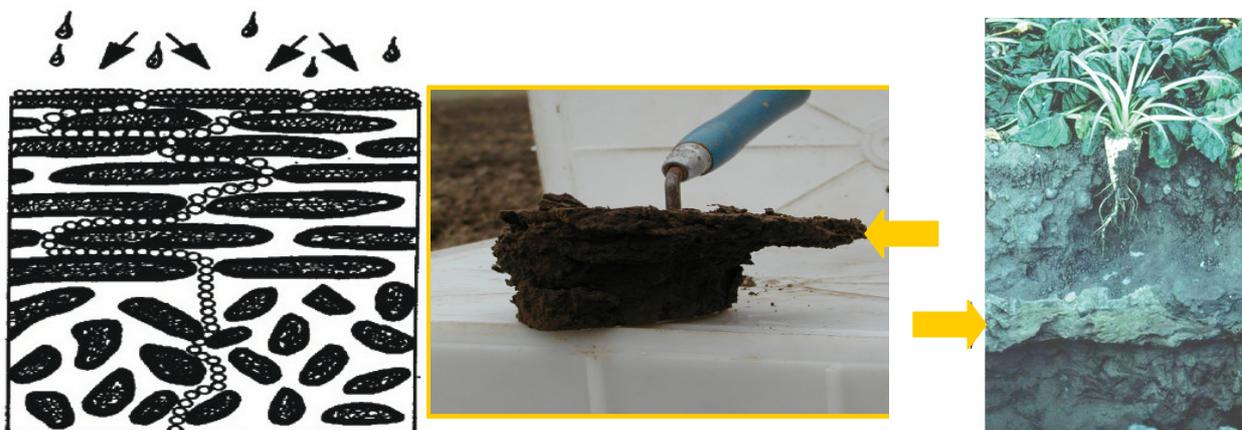


Abbildung 4: Folge der mechanischen horizontalen Einregelung von Bodenpartikeln für die Bodenstruktur (Bildquelle: HORN 2001 & ANSORGE D. & R. GODWIN 2007)

Neben der Einschränkungen der ökologischen Funktionen des Bodens insbesondere der landwirtschaftlichen Produktionsfunktion sowie der Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion des Bodens werden auch mögliche Risiken auf Umweltgüter außerhalb der Landwirtschaft genannt (VAN DER PLOEG ET AL. 2006):

- Größere Hochwassergefahr
- Verstärkung der Bodenerosion
- Emissionen von klimarelevanten Spurengasen (insbesondere Lachgas - N_2O)

Die Fahrspur als sichtbarer Indikator einer aktuellen Bodenschadverdichtung

Dem Boden kommt aus der Sicht der Arbeitserledigung bei termingebundenen Arbeitsgängen in seiner Funktion als Fahrbahn eine wichtige Rolle zu. Die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden ist zeitlich und örtlich verschieden. Hinsichtlich der Minderung der Spurrillen und somit von etwaigen Bodenschadverdichtungen ist der „richtige“ Zeitpunkt für die Befahrbarkeit einzuhalten. Spurrillen verursachen bei der Nachfolgebearbeitung nicht nur einen erhöhten Zugkraftbedarf, sondern können auch die Zielfahrtgeschwindigkeit enorm mindern, wodurch sich Grenzen für das sog. „high speed farming“ ergeben (siehe Abbildung 5).

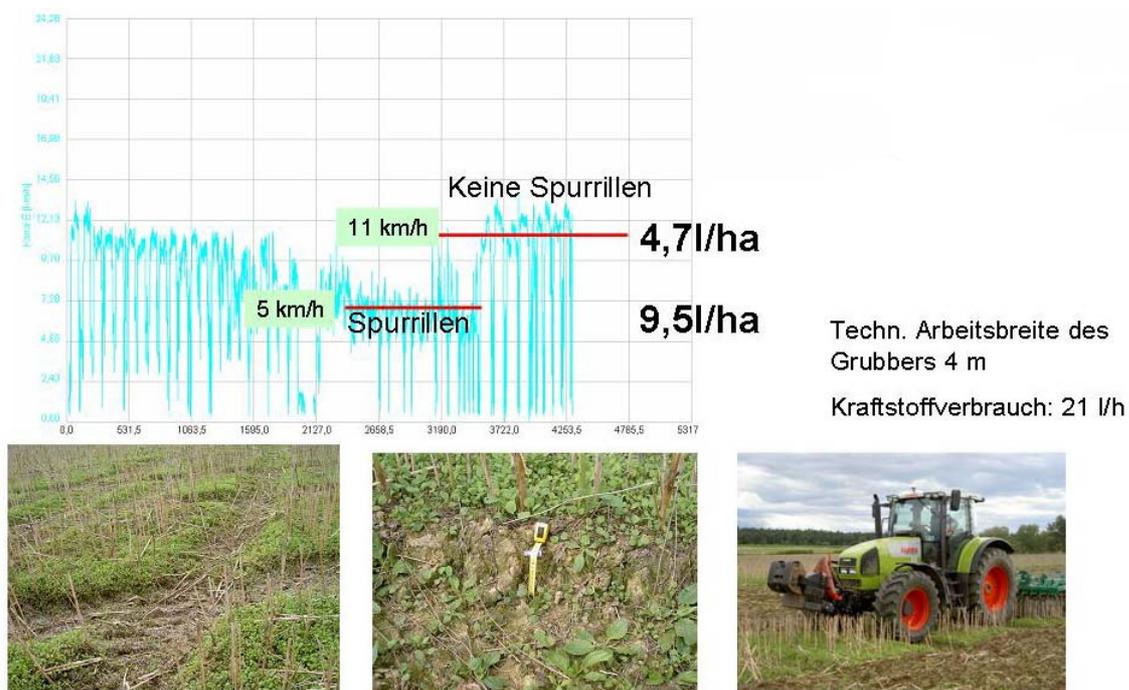


Abbildung 5: Folgewirkungen von Spurrillen aus der Rapsernte für die Stoppelbearbeitung hinsichtlich Fahrgeschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch.

Spurrillen und deren Folgewirkungen (Abbildung 5 und 6) resultieren aus der Aufgabe des Bodens einerseits als Pflanzenstandort und andererseits als Fahrbahn. Die Lösung des Konfliktes liegt in sog. Regel-Fahrspur-Verfahren (siehe Kapitel 6.2).



Abbildung 6: Folgewirkungen von Spurrillen aus dem Striegeleinsatz im Frühjahr. Aufgenommen bei der Herbstfurche 2006 in Raasdorf (NÖ)

4. Maschinenbedingte Faktoren der Bodenbelastung

Maschinenbedingte Faktoren lassen sich vereinfacht auf die Kontaktfläche und Radlast reduzieren, woraus sich der **mittlere Kontaktflächendruck** errechnet:

$$\text{mittlerer Kontaktflächendruck [bar]} = \frac{\text{Radlast [N]}}{\text{Kontaktfläche [cm}^2\text{]}} \times 10$$

Der mittlere Kontaktflächendruck dient zur Quantifizierung der Bodenbelastung in der Spur. Die Kontaktfläche in der Boden/Reifenpaarung wird durch die **Reifendimension** (Bauart, Breite, Durchmesser), den **Reifeninnendruck** und durch die **Radlast** bestimmt. Die Kontaktfläche ist aber auch eine Funktion der Festigkeit des Bodens. Ein lockerer Boden führt zu einer höheren Kontaktfläche als ein fester.

Bei Untersuchungen zur Bodenbelastung werden häufig nur die Haupträder, welche die höchste Achslast tragen, herangezogen.

4. 1 Entwicklung der Radlasten bei Landmaschinen

Die Entwicklung in den letzten 50 Jahren war durch eine leistungsfähigere Mechanisierung in der Außenwirtschaft geprägt. Dies äußerte sich in der gestiegenen Arbeitsproduktivität, die u. a. durch erhöhte Flächenleistungen erreicht wurde. Die leistungsfähigeren Maschinen zeichnen sich durch erhöhte Durchsatzleistungen (Massenstrom) und Bunkerkapazitäten aus. Mit der Durchsatzleistung und Bunkerkapazität nahmen die Eigen- und Nutzmasse der Landmaschinen und somit auch die Radlasten zu.

Die Radlast bei **Mähdreschern** wird v. a. durch die Schnittbreite, Korntankvolumen und Motorleistung bestimmt. Auf die Vorderachslast kommen beim leeren Korntank ca. 75 % der Maschinenlast. Diese Achslastaufteilung bleibt auch beim vollen Korntank ähnlich.

Der erste in Europa gebaute Selbstfahrmähdrescher von Claas (Arbeitsbreite 3 m) hatte eine Gesamtmasse mit gefüllten Tank von 5,8 t (Vorderradlast: 2,2 t). Die heutigen Hochleistungsmähdrescher (Arbeitsbreite 7,5 m) erreichen Gesamtmassen von knapp 29 t (Vorderradlast: 10,9 t). Der mittlere Spurflächenanteil der Haupträder nahm leicht von 25 % auf 21 % ab, während hingegen der mittlere Belastungsindex (beschreibt die flächenbezogene Belastung; OLFE, 1995) von 66 auf 154 t*km/ha ansteigt (Abbildung 7).

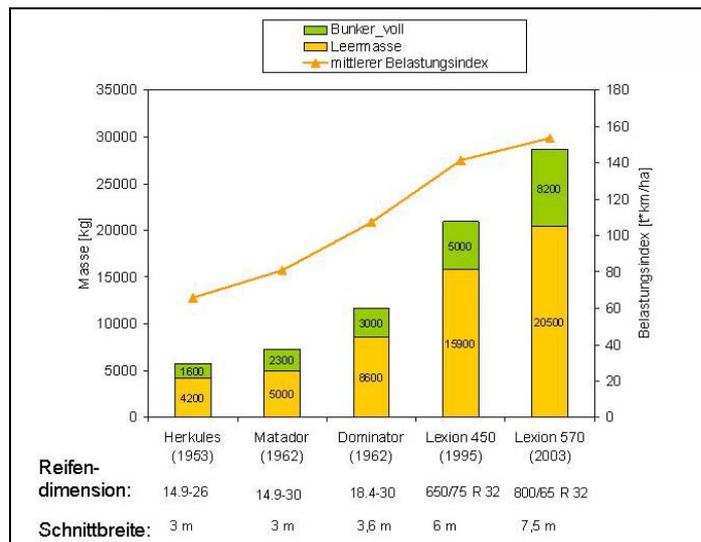


Abbildung 7: Entwicklung der Leer- und Gesamtmassen sowie der spurflächenbezogenen Belastung (ausgedrückt als mittlerer Belastungsindex in t*km/ha). Maschinenparameter übernommen von BERNHARDT ET AL. 2006.

Bei **Allradtraktoren** wird bei gegebener statischer Achslastverteilung zwischen Hinter- und Vorderachse die Radlast durch die zusätzliche Frontballastierung, durch Anbaugeräte und durch die dynamische Gewichtsverlagerung bei Zugarbeit verändert. Bei Traktoren (leerer Zustand) steigt die Radlast im Allgemeinen mit der Motorleistung auf bis 2,8 t (bei 250 kW). 50 kW-Traktoren stützen im Hinterrad ca. 1 t ab. Die technisch höchst zulässigen Radlasten steigen mit der Leistung stärker an und erreichen bei einem 250 kW-Traktor rd. 5 t (WEIBBACH, 2004)

Landwirtschaftliche Transportfahrzeuge fahren sowohl auf öffentlichen Straßen als auch im Feld und stellen somit unterschiedliche Ansprüche an die Fahrwerke.

In der 26. Novelle des KFG vom Oktober 2005 sind die letzten Änderungen hinsichtlich der Bestimmungen für die Abmessungen und das Gesamtgewicht von land- und forstwirtschaftlichen Anhängern durchgeführt worden. Die max. zulässigen Anhänger-Gesamt-Gewichte betragen bei Einachsanhängern 10 t, Zweiachsanhänger 18 t, Anhängern mit mehr als 2 Achsen 24 t und landwirtschaftlichen Vierachsanhängern 32 t. Bei Tandemachsanhängern ist die max. Summe der Achslasten der zwei Achsen bestimmt durch die Radstände (Achsabstände): < 1 m Achsabstand – max. 11,5 t; 1 – 1,3 m Achsabstand – max. 16 t; 1,3 – 1,8 m Achsabstand – max. 18 t; > 1,8 m Achsabstand – max. 20 t. Die Summe der Achslasten einer Dreifachachse darf bei Radständen von < 1,3 m den Wert von 21 t und bei Radständen von 1,3 – 1,4 m den Wert von 24 t nicht überschreiten.

Weitere Bestimmungen siehe auch in der 7. überarbeiteten Auflage der Broschüre „Der Traktor im Straßenverkehr“ (ÖKL, 2006).

Gülletankwagen im gefüllten Zustand weisen je nach Fassungsvermögen und Anzahl der Achsen Radlasten von 4 – 6 t auf. Muldenkipper: 3 – 4,5 t; Ladewagen: 2 – 4,5 t; Transporthäckselselwagen 4 t.

Bei der Ernte von Zuckerrüben und Kartoffeln mittels Bunkerrodern werden hohe Massenströme/Hektar umgesetzt, die sich je nach Rodesystem auch in unterschiedlichen Radlasten zeigen: Gezogene **2- und 3-reihige Köpfrdebunker** weisen mit leerem Bunker eine mittlere Radlast von 3 t auf. Bei 2-Reihern mit gefülltem Bunker werden Radlasten von 4 t und bei 3-Reihern von bis zu 6 t erreicht. Durch die asymmetrische Anordnung der Bunker können Radlasten am 3-Reiher bis 8 t auftreten. **6-reihige Köpfrdebunker** weisen bereits ein Leergewicht von 25 t auf. Mit einer Bunkerkapazität von bis zu 25 t werden Maschinenmassen von 50 t erreicht. Die Achslastverteilung wird durch die Bunkergröße bestimmt. Während bei großem Bunker (> 17 t) die Achslastverteilung ziemlich ausgeglichen ist, stützen Roder mit kleinem Bunker (8 t) rund 77 % der Gesamtmasse über die Vorderachse ab. Roder mit 5 oder 6 Rädern besitzen eine ausgeglichene Lastverteilung auf alle Räder. Die höchsten Radlasten (> 12 t) werden unter den Heckrädern von 2-achsigen Köpfrdebunker (6reihig) bei gefülltem Bunker gemessen (WEIßBACH, 2004).

Bei der **Kartoffelernte** mit **gezogenem 1-reihigen Bunkerroder** beträgt die mittlere Radlast mit leerem Bunker rd. 2 t; mit gefülltem Bunker rd. 4 t. Bei gezogenen 2-reihigen Bunkerrodern werden Radlasten im leeren Zustand von 4 t und mit gefülltem Bunker von bis zu 7 t erreicht. Selbstfahr-Bunkerroder (4reihig) können Gesamtmassen von bis zu 50 t erreichen.

4. 2 Entwicklung der Kontaktflächendrücke bei Landmaschinen

Der mittlere Kontaktflächendruck (= vertikale Gewichtskraft/Kontaktfläche des Reifens) konnte dank neuer Reifentechnologien im Großen und Ganzen gleich gehalten werden, wie das Beispiel für Mähdrescher in Abbildung 8 zeigt.

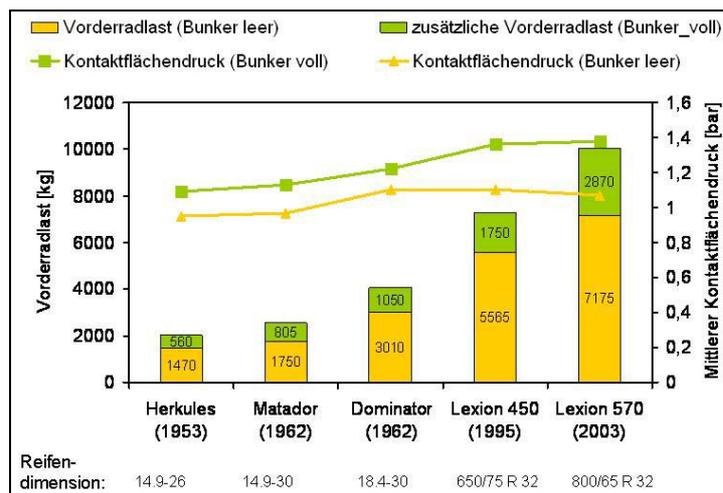


Abbildung 8: Entwicklung der Vorderradlasten sowie des mittleren Kontaktflächendrucks bei Mähdreschern. Maschinenparameter übernommen von BERNHARDT ET AL. 2006.

Dieser beträgt (berechnet mit dem praxisbezogenen Maschinenlast- und Bodenbeurteilungsprogramm TASC der FAT Tänikon) bei den am höchsten belasteten Vorderrädern ca. 1,3 bar.

4. 3 Mittlerer Kontaktflächendruck versus Radlast

Mit der Reifenwahl (Radialreifen, Reifendurchmesser, Reifenbreite) und dem Reifeninnendruck kann der mittlere Kontaktflächendruck gesteuert werden. Eine größere Kontaktfläche bewirkt aber bei gleicher Radlast eine mechanische Beanspruchung eines größeren Bodenvolumens und damit auch eine Tiefenwirkung des Bodendrucks (Abbildung 9). *Die Radlast ist daher die entscheidende Größe, die bestimmt, mit welchem Gradienten der Druck mit der Tiefe abnimmt und wie tief ein bestimmter Druck in den Boden eindringt (BRANDHUBER, 2006).*

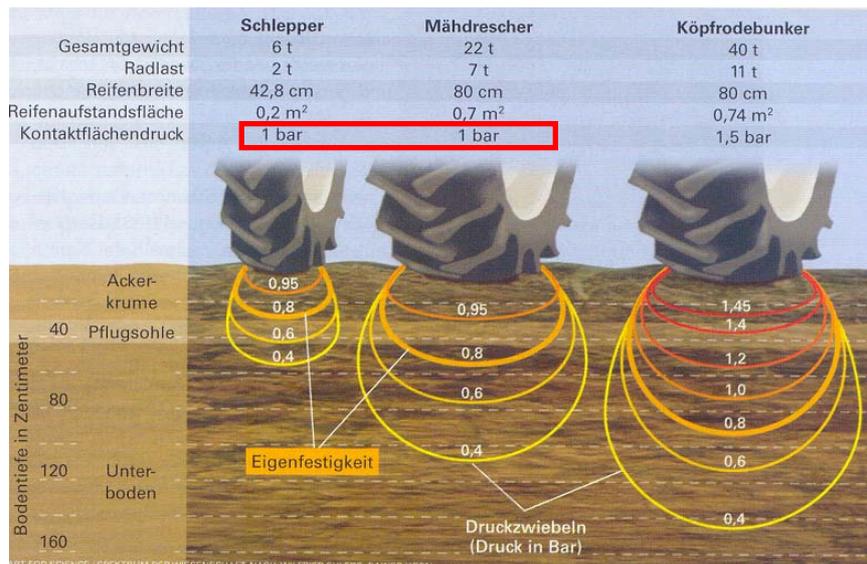


Abbildung 9: Druckzwiebeln bei unterschiedlichen Radlasten und Kontaktflächendrücken (Bildquelle: VON RIENK R. VAN DER PLOEG ET AL. In: Spektrum der Wissenschaft, August 2006)

Trotz der hohen Radlasten (Abbildung 10) konnte durch die neuen Reifentechnologie (z.B. Breitreifen) die mittleren Kontaktflächendrücke auf niedrigem Niveau gehalten werden.

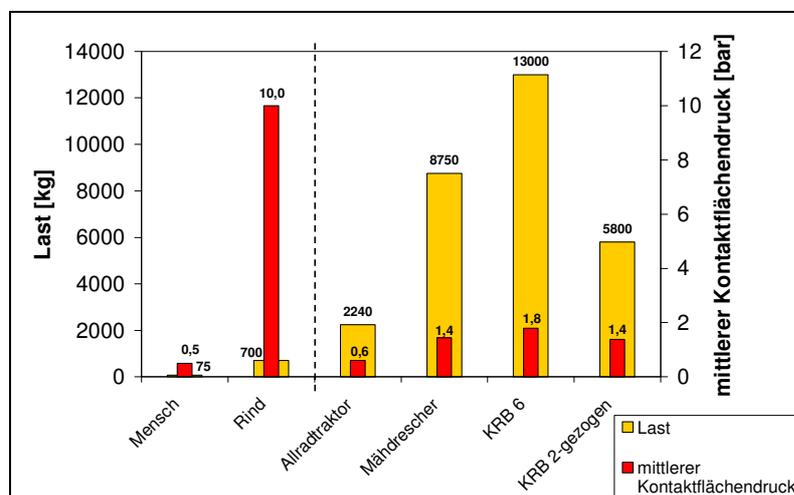


Abbildung 10: Mittlerer Kontaktflächendruck und abzustützte Lasten im Vergleich. KRB = Köpfrdebunker.

Um das Risiko von Unterbodenverdichtungen möglichst gering zu halten, müssen die Kontaktflächen bei hohen Radlasten (z.B. voll beladene Ausbring-, Ernte- und Transportfahrzeuge) **überproportional größer** werden (BRANDHUBER, 2006).

Bis dato gibt es kein wissenschaftlich akkordiertes Modell welches den Kontaktflächendruck, die Radlast und die relevanten Bodenparameter (Bodenart, Feuchte etc.) umfassend in ihrer

Tiefenwirkung beschreibt. In der Literatur wird die Radlast als Haupteinflussfaktor auf den Bodendruck im Unterboden beschrieben.

Neben der Bereifung (angepasster Reifeninnendruck, Breit- bzw. Zwillingsbereifung), der Verbesserung der Eigenstabilität des Bodens (schonende Lockerung, humusaufbauende Bewirtschaftung,) und der Anpassung von Arbeitsverfahren (Verringerung von Überfahrten, Onland-Pflügen,...) werden die **kritischen Radlasten** für den umfassenden physikalischen Bodenschutz zunehmend an Relevanz gewinnen

Der **Radlastverringerung** gewinnt daher im Sinne des vorsorglichen Bodenschutzes an Bedeutung. Schon mit der Investitionsentscheidung beginnt vorsorglicher Bodenschutz. Vergleicht man die Leergewichte von Allradtraktoren unterschiedlicher Leistungsklassen, so können diese innerhalb der Leistungsklasse erheblich schwanken (Abbildung 11).

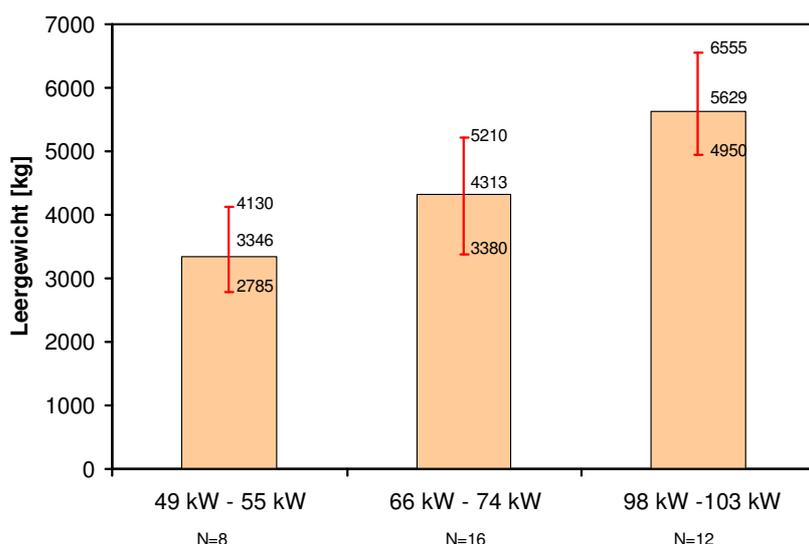


Abbildung 11: Vergleich der Leergewichte bei Allradtraktoren

5. Acker- und pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten

Hier sind überwiegend Maßnahmen anzuführen, die die **Bodenfruchtbarkeit und somit auch die Tragfähigkeit der Böden erhöhen** (VDI Richtlinie 6101):

- **Weite, ausgewogene Fruchtfolgen** mit genügend Zeit zwischen Ernte und Saat für die schonende Bodenbearbeitung und für den Anbau von Zwischenfrüchten zur Förderung der Bodengare.
- **Auswahl frühreifer Kulturen**, um Ernte und Bodenbearbeitung bei möglichst trockenen Bodenzuständen durchführen zu könne
- **Zwischenfruchtanbau** zur Stabilisierung der Bodenstruktur, Minderung von Verschlammung und Bodenerosion sowie Förderung des Bodenlebens
- **Fruchtfolgespezifische Kalkung** zur Erhöhung der Stabilität der Bodenstruktur
- **Regulierung des Wasserhaushaltes** auf staunassen Böden durch Drainage

Maßnahmen der **schonenden Bodenbearbeitung** zielen ebenfalls auf die Steigerung der Tragfähigkeit des Bodens ab.

Grundsätzlich ist ein lockerer Boden verdichtungsanfälliger als ein kompakter.

Mit der **konservierenden Bodenbearbeitung** (z. B. Mulchsaat, Streifensaar oder Direktsaat) wird die Tragfähigkeit des Bodens erhöht, die gerade bei der Ernte notwendig ist. Untersuchungen an der FAL Braunschweig Völkenrode zeigten, dass die Einsinktiefen der Räder bei der Zuckerrübenenernte geringer ist, wenn die Zuckerrüben mittels Mulchsaat bestellt wurden (Abbildung 12).

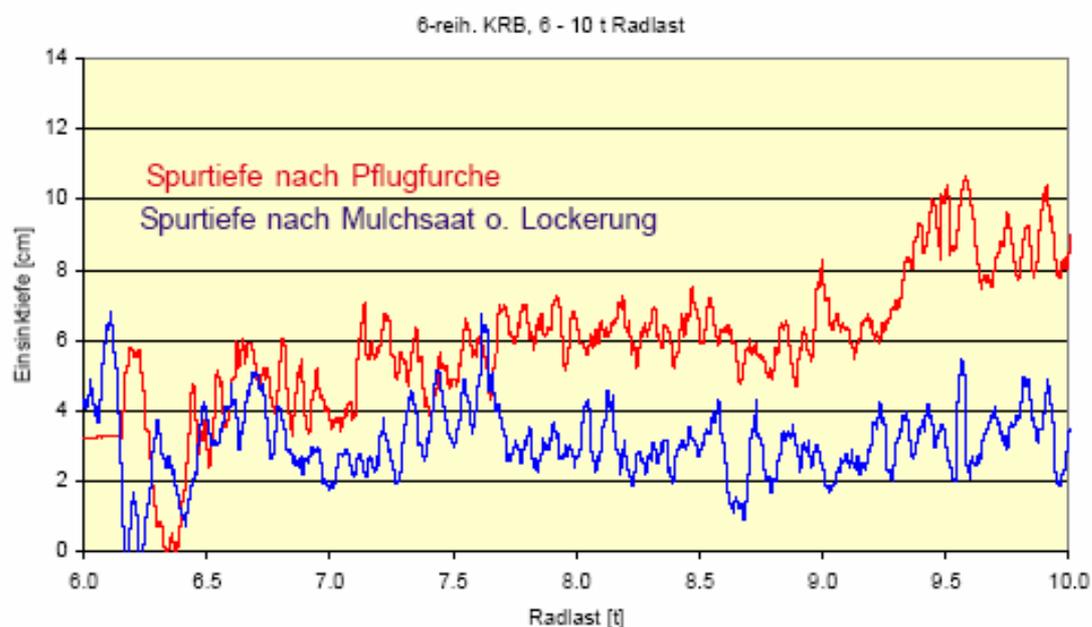


Abbildung 12: Einsinktiefe eines sechsstreifigen Köpfrödebunkers bei der Zuckerrüben-ernte am 15. 11. 1999 (Adenstedt). Durchschnittliche Bodenfeuchte bei der Ernte, 24 Gew.-%. (BRUNOTTE & WAGNER, 2001).

Messungen (WEIßBACH, 2002) zum Bodendruck bestätigen, dass unter Mulch-Direktsaat bei der Zuckerrüben-ernte der Bodendruck schneller abgebaut wird als unter konventionell bestellten Flächen (Abbildung 13).

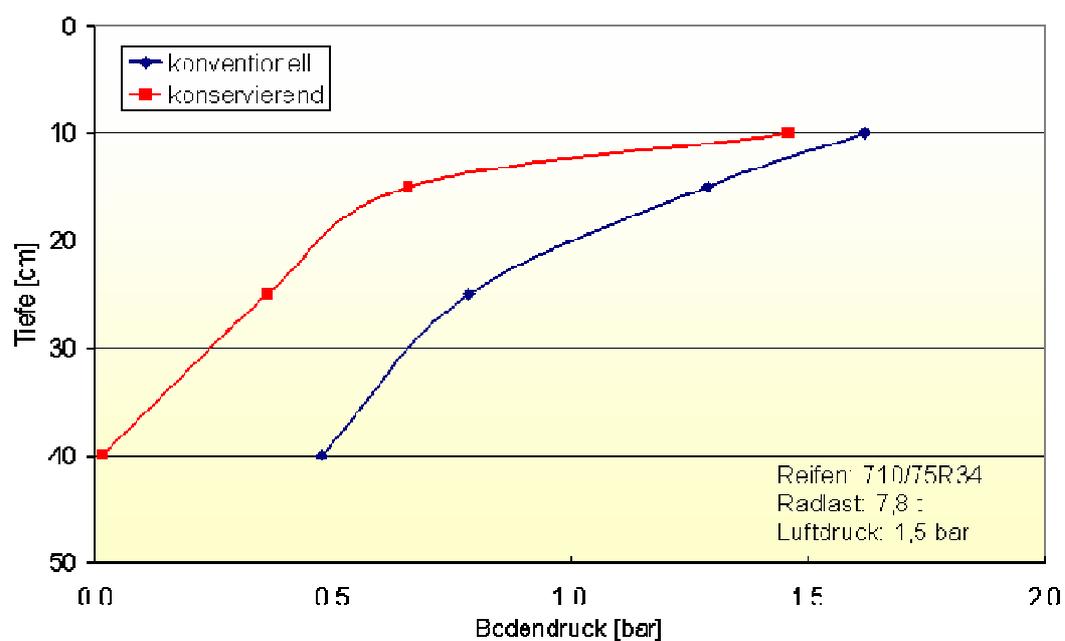


Abbildung 13: Verlauf des Bodendrucks bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungs-strategien (WEIßBACH, 2006).

Neben der konservierenden Bodenbearbeitung werden weitere Maßnahmen vorgeschlagen (VDI Richtlinie 6101):

- **Intensität und Tiefe der Bodenbearbeitung** auf das **notwendige beschränken**.
- **Bearbeitungsintensität** (Werkzeuggeschwindigkeit: 4 – 8 m/s) an die Bodenverhältnisse anpassen.
- Bearbeitungshäufigkeit ist durch Gerätekoppelung zu reduzieren (**Minderung der Überrollhäufigkeit**).
- **trockene Sommerpflugfurche** ist günstiger zu beurteilen, als eine späte Herbstfurche.
- **Unterbodenlockerung nur nach sehr sorgfältiger Spatendiagnose** unter Berücksichtigung von Schadschwellen (Luftkapazität < 5 Vol - %); Lockerung in Kombination mit Zwischenfruchtanbau.

6. Landtechnische Möglichkeiten zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen

Nach GEISCHEDER & DEMMEL (2006) lassen sich die technischen Möglichkeiten in zwei Ansatzpunkte für bodenschonendes Befahren gliedern:

- Optimierung des Systems Reifen - Boden
- Anpassung von Mechanisierungsverfahren

6.1.1 Optimierung des Systems Reifen – Boden

Angepasster Reifeninnendruck

Ein geringer Reifendruck resultiert inaus einem niedrigen Bodendruck. Untersuchungen am der Universität Kiel zeigten, dass bei Radialreifen der Bodendruck in 10 cm Tiefe etwa dem Reifeninnendruck entspricht (WEIßBACH, 2003). Mit zunehmender Tiefe wird der bodendruckmindernde Effekt einer Reifendruckabsenkung geringer (Abbildung 14), was den Einfluss der Radlast auf die Tiefenwirkung der Bodenbeanspruchung erklärt (KELLER & ARVIDSSON, 2004).

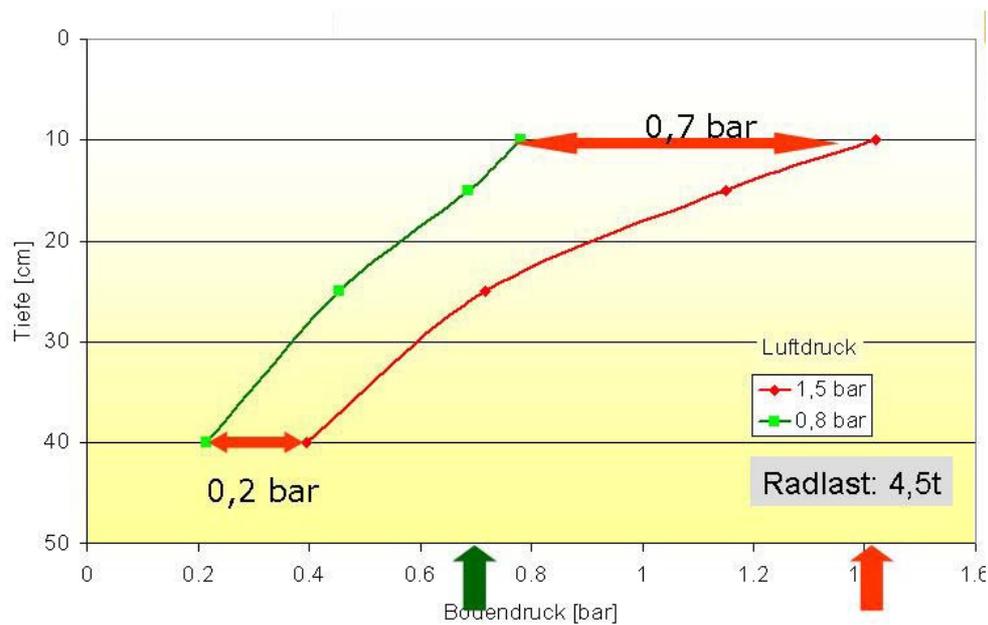


Abbildung 14: Bodendruckverlauf bei Reifendruckabsenkung; Reifendimension: 650/85R38 (WEIßBACH, 2006)

Moderne Radialreifen für Landmaschinen besitzen ein hohes Potenzial zur Bodenschonung, welches jedoch durch Anpassung des Reifeninnendruckes an die jeweiligen Einsatzverhältnisse (Radlast, Arbeitsgeschwindigkeit) umgesetzt werden muss. Der Reifendruckabsenkung sind jedoch technische Grenzen gesetzt. Der einzustellende Reifeninnendruck hängt von der geforderten Reifentragfähigkeit, von der Reifenbauart, der Reifengröße und der Fahrgeschwindigkeit ab und kann in den Reifenluftdurchlisten und Betriebsanleitungen der Reifenhersteller abgelesen werden (GEISCHEDER & DEMMEL, 2006).

Grundsätzlich können für die Feldarbeit folgende Richtwerte empfohlen werden: max. 1 bar bei der Bestellung und max. 2 bar bei der Ernte.

Neben der Bodenschonung können durch den reduzierten Reifendruck Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20 % durch den verminderten Schlupf realisiert werden.

Kritisch sind die Bereifungen von Transportfahrzeugen und von Pflgetraktoren zu bezeichnen. Hochdruckbereifungen von Zweiachsanhängern führen bei einer Radlast von 4 t und einem Reifeninnendruck von 8 bar zu einem Bodendruck von 8 bar in 10 cm Tiefe. Die Umrüstung auf bodenschonende Radialbereifung ist mit Mehrkosten von etwa 250 € durchführbar (GEISCHEDER & DEMMEL, 2006).

Schmale Pflegebereifungen erfordern aufgrund der Tragfähigkeit höhere Reifeninnendrucke von deutlich über 3 bar. Die Nutzung einer Standard- oder sogar Breitbereifung ermöglicht

ein bodenschonenderes Befahren mit niedrigeren Reifeninnendrücken. Spurrillen können damit vermieden werden (Abbildung 15).



Abbildung 15: Auswirkungen unterschiedlicher Bereifung auf die Spurrillenbildung (aufgenommen bei den DLG-Feldtagen 2006 in Hanau; Hessen)

Die Forderung, im Feldeinsatz den Reifendruck auf unter 1 bar zu reduzieren kann durch den Einsatz von automatischen Reifendruckregleranlagen (siehe auch www.reifenregler.de) realisiert werden. Daneben gibt es am Markt ein neues Reifenkonzept bei dem ein radialer Niederquerschnittsreifen einen einheitlichen Reifeninnendruck von max. 1 bar im Feld- als auch im Straßeneinsatz erlaubt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Leistungseigenschaften Michelin XeoBib im Vergleich zum 65-Serienreifen Michelin XM 108 (SCHLEE 2004)

	XM 108	XeoBib
Dimension	600/65 R 38	650/60 R 38
Load-Index	153	155
Speed-Index	B (50 km/h)	D (65 km/h)
Luftdruck Straße (50 km/h; 3650 kg)	1,8 bar	1 bar
Luftdruck Feld (Arbeiten unter Drehmoment; Last 3650 kg)	1,2 bar	1 bar
Bodenkontaktfläche (lockerer Boden, Last 3650 kg)	3.570 cm ² (1,4 bar)	4.440 cm ² (1 bar)
Spurtiefe, Last 3650 kg	46 mm	21 mm
Verschleiß - relativ	100 %	116 %
Rollwiderstand (lockerer Boden) - relativ	100 %	80 %
Rollwiderstand (Straße) - relativ	100 %	100 %
Zugkraft - relativ	100 %	103 - 105 %

Der **Einsatz von Reifendruckverstellanlagen** ist insbesondere aus Auslastungsgründen für Großbetriebe, Lohnunternehmen und Maschinenringe zu empfehlen. Günstige Lösungen sind mobile Rüstsätze, bei denen die herkömmlichen Ventile durch Druckluftanschlusskupplungen ersetzt werden. Über einen Befüllschlauch von der Traktordruckluftbremse kann ein Standardreifen manometerüberwacht auf den geforderten Reifeninnendruck eingestellt werden. Solche mobile Rüstsätze kosten ca. 180 € (incl. MwSt.) und werden eingesetzt, wenn der Reifeninnendruck nicht öfters als ein- bis zweimal pro Tag verändert werden soll z. B. bei der Bodenbearbeitung (GEISCHEDER & DEMMEL, 2006). Beim häufigen Wechsel zwischen Straße und Feld z. B. bei der Gülleausbringung sind festeingebaute Reifendruckverstellanlagen notwendig, die als Einleiter- und Zweileiter-Technik angeboten werden. Die Kosten bewegen sich dabei zwischen ca. 1.800 € und 2.900 €.

6. 1. 2 Schlupfminderung durch reduzierten Reifeninnendruck

Unter Schlupf versteht man einen relativen Zeit- bzw. Wegverlust, der sich in einer verringerten Flächenleistung und somit erhöhten Kraftstoffverbrauch pro Hektar äußert. Mit dem Absenken des Reifeninnendrucks erhöht sich die wirksame Traktionsfläche, wodurch der Schlupf minimiert werden kann (Abbildung 16).

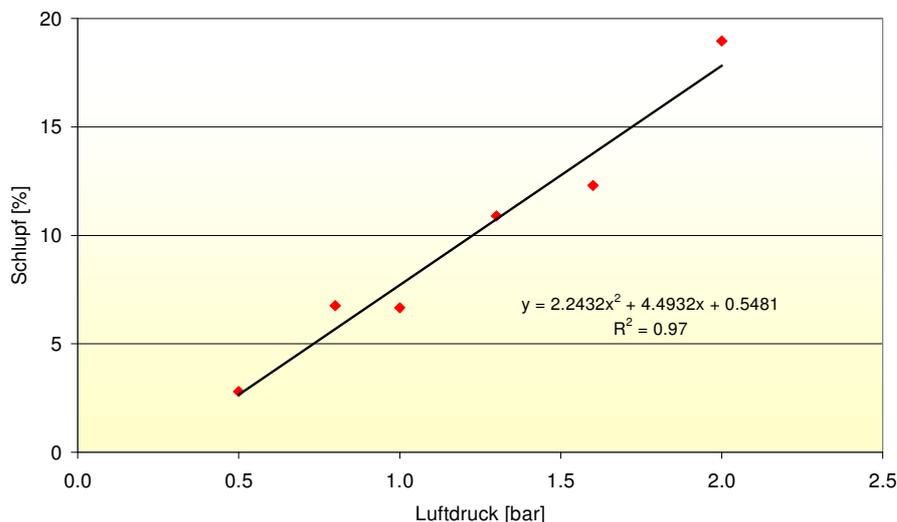


Abbildung 16: Auswirkungen eines reduzierten Reifeninnendrucks auf den Schlupf (WEIßBACH, 2006)

Eine höhere nutzbare Zugleistung (Produkt aus Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit) ist die Konsequenz (Abbildung 17).

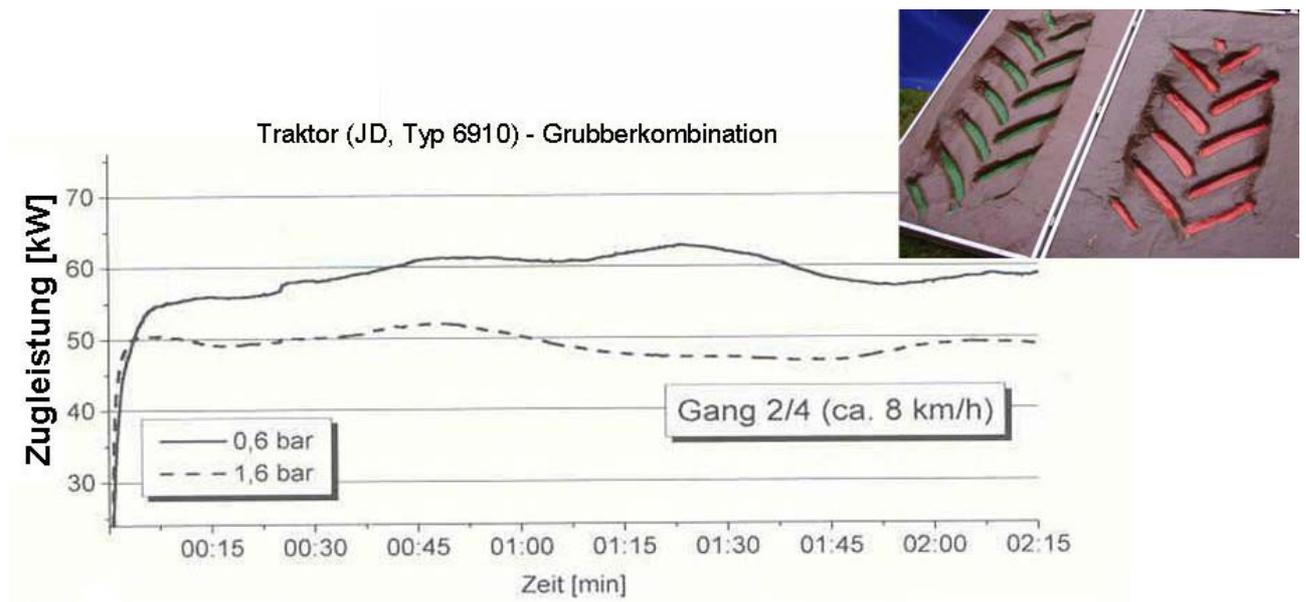


Abbildung 17: Zugleistungssteigerung durch reduzierten Reifeninnendruck (PÜTZ ET AL. 2001)

Neben der Bodenschonung lassen sich durch eine Reifendruckanpassung an die Einsatzbedingungen (0,8 bar bei Feldarbeiten und 1,6 bar bei Straßenfahrt) Kraftstoffeinsparungen von 5 – 20 % realisieren (VOLK, 2003).

Eindrucksvoll wurde der Einfluss der Bereifung und des Reifeninnendrucks auf den Schlupf bei den DLG-Feldtagen 2006 in Hanau (Hessen) demonstriert (Abbildung 18 und 19).



Abbildung 18: Gleiche Bedingungen beim Grubbern mit unterschiedlicher Bereifung (rechts: Standardbereifung, Mitte: reduzierter Reifendruck; links: Zwillingsbereifung)



Abbildung 19: Resultat nach 100 m Versuchsfahrt

6. 1. 3 Neue Fahrwerkskonzepte

Mit neuen Fahrwerkskonzepten (Verteilung des Fahrzeuggewichts auf 3 Achsen, Vermeiden von Mehrfachüberrollung durch spurversetztes Fahren) verfolgt man das Ziel, die wirksame Kontaktflächen zur vergrößern bzw. gleichmäßig zu verteilen. **Gummibandlaufwerke** bekommen aufgrund der großen Aufstandsfläche und der hohen Zugkräfte bei schweren Erntemaschinen und Zugmaschinen bereits zum Einsatz. Die Kontaktflächenvergrößerung erfolgt über die Länge des Laufbandes, wodurch eine „schmale“ Bauweise des Fahrwerkes ermöglicht wird. Den Ursprung haben die Bandlaufwerke in Form von Gleisketten bei Erdbewegungsmaschinen, wo hohe Zugkräfte aufgebracht werden müssen. Gummibandlaufwerke kommen dort zum Einsatz, wo die Zugkraftübertragung bei Radtraktoren an Grenzen bzw. wo bewusst die Bodenschonung im Vordergrund steht (bei Erntemaschinen wie Mähdreschern, Zuckerrüben- und Kartoffelvollerntern). Gummibandlaufwerke haben dabei den Vorteil der Bodenschonung, ohne die maximal zulässige Transportbreite von 3,5 m zu überschreiten.

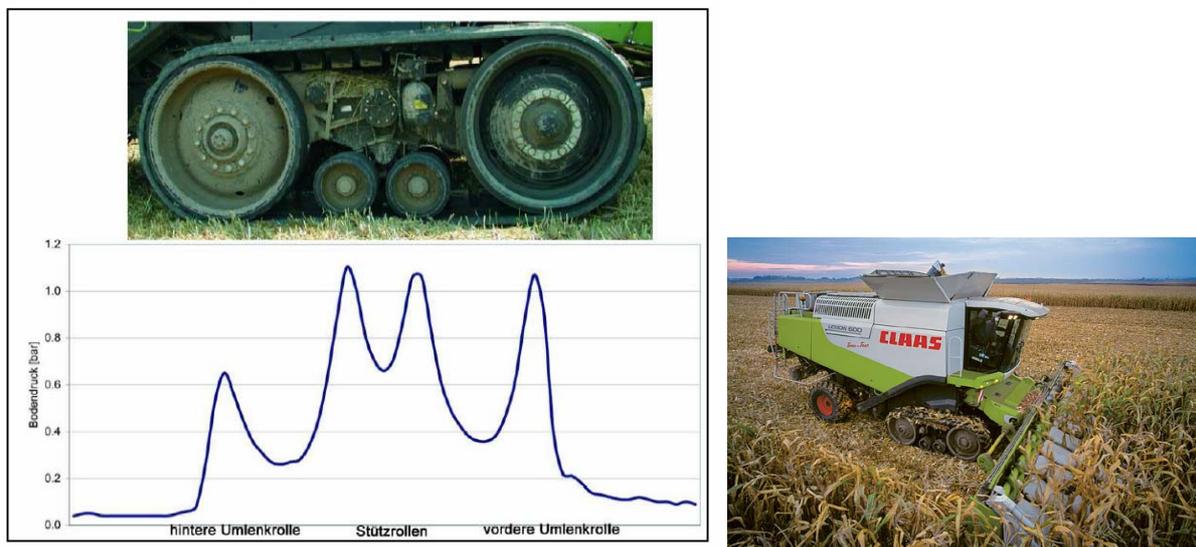


Abbildung 20: Drucklauf unter einem Gummibandlaufwerk bei 10 cm Bodentiefe (RADEMACHER & WEIBACH, 2004)

Durch Vorspannung des Gummibandes auf 20 t können die ausgeprägten Druckspitzen (Abbildung 20), die unter den Umlenk- und Stützrollen der Bandlaufwerke der ersten Generation auftraten, verringert werden.

Messergebnisse zum Bodendruck vom Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel zeigten, dass eine Zwillingsbereifung beim Mähdröschler den gleichen bodenschonenden Effekt hat wie das Gummibandlaufwerk (WEIßBACH, 2004).

Bodendeformationsmessungen unter kontrollierten Laborbedingungen an der Cranfield Universität in Silsoe (Großbritannien) konnten aufzeigen, dass Bandlaufwerke bei Mähdröschern die Bodenverdichtung (indirekt ausgedrückt über den Eindringwiderstand) in den oberen 20 cm lokalisieren, während unter Standardbereifungen die Verdichtungen im Unterboden auftreten (ANSORGE & GODWIN, 2007).

6. 2 Anpassung von Mechanisierungsverfahren

Beim Pflügen, bei dem ausschließlich in der Furche gefahren wird, wirkt die hohe Radlast des furchenseitigen Traktorhinterrades direkt auf den Unterboden. Rund 45 % des Traktorgesamtgewichtes (incl. Pfluggewicht und Ballast) und 50 % der Zugleistung stützen sich nach RENIUS (1987) auf das furchenseitige Hinterrad ab (Abbildung 21).

In den meisten Ackerflächen, bei denen für die Grundbodenbearbeitung der Pflug eingesetzt wurde, lässt sich daher eine verdichtete Grenzfläche (Pflugsohle bzw. Furchenradsohle) ab einer Tiefe von 24 cm nachweisen (HAMEDINGER, 2004) nachweisen.

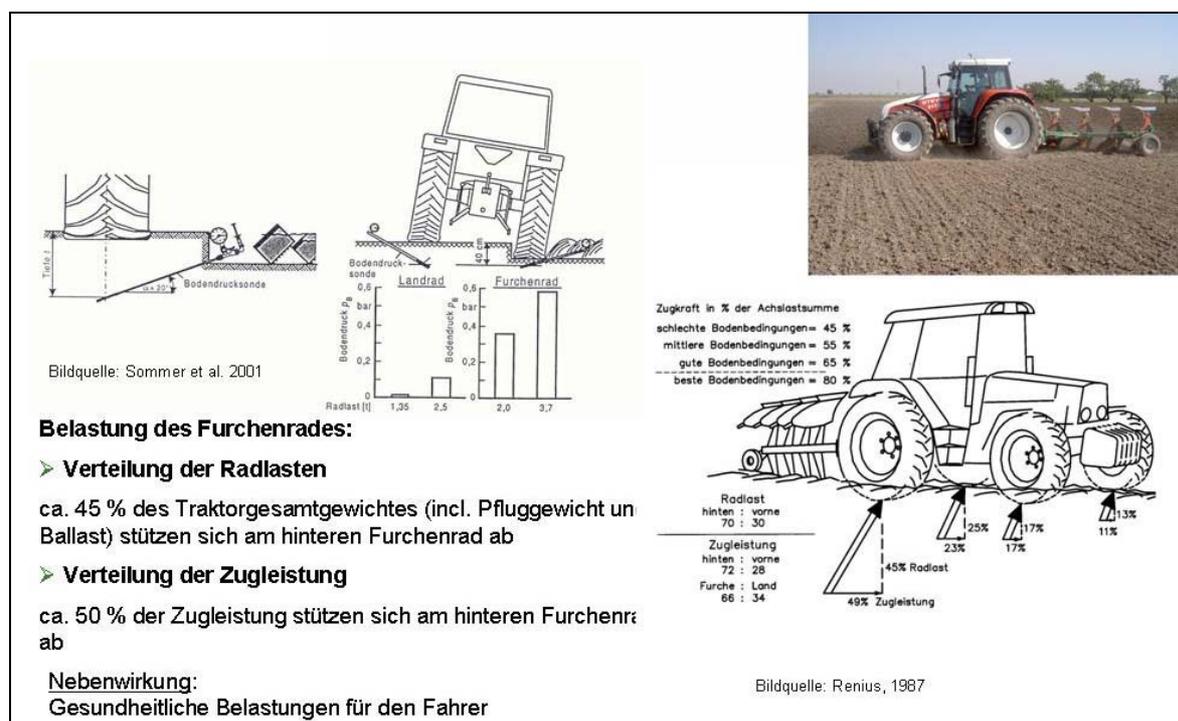


Abbildung 21: Besonderheiten des Pflügens in der Furche

Mit dem Verfahren des „**On-Land-Pflügens**“ können Bodenverdichtungen im Unterboden vermindert werden, da wie beim Grubbern auf unbearbeitetem Boden gefahren wird (Abbildung 22). Kein Traktorrads fährt in der Furche, womit das Verdichten und Verschmieren in der Furchensohle vermieden wird. Zudem wird der Sitzkomfort für den Fahrer verbessert. Das On-Land-Pflügen ermöglicht den Einsatz von großvolumigen Reifen bzw. Zwillingsreifen. Um einen geradlinigen Zug zu erreichen, soll die Arbeitsbreite des Pfluges mindestens so groß sein, wie die Traktorbreite.



Abbildung 22: On-Land-Pflügen (Bildquelle von SOMMER & ZACH, 1992 in VDI-Richtlinie 6101)

Bei ungünstigen Bodenverhältnissen an der Oberfläche ist über eine hydraulische Umstellung auch Pflügen in der Furche möglich.

Um den Zielkonflikt zwischen Boden als Pflanzenstandort und als Fahrbahn zu lösen wird das „**Regel-Fahrspur-Verfahren**“ (engl. **Controlled Traffic Farming, CTF**) in Australien, England und Holland bereits erprobt und praktiziert (Abbildung 23). Die im Feld gelegten ortsfesten Fahrspuren werden bei der Bodenbearbeitung, zur Saat, zur Pflege sowie zur Ernte befahren. In Australien werden bereits mehr als 2 Mio. Hektar Ackerland mit dem Ziel einer verbesserten Wasserinfiltration und verminderter Erosion bei Starkregen mit dem CTF-Verfahren bewirtschaftet. Ein automatisches Lenksystem auf Basis der Satellitenortung (RTK bzw. DGPS) ist bei Traktoren und Erntemaschinen für das spurtreue Fahren erforderlich. Mehrjährige Untersuchungen zeigten Mehrerträge von durchschnittlich 10 % bei einem geringeren Zugkraftbedarf auf unbefahrenen Zonen (86 % der Fläche); zitiert in GEISCHEDER & DEMMEL, 2006.

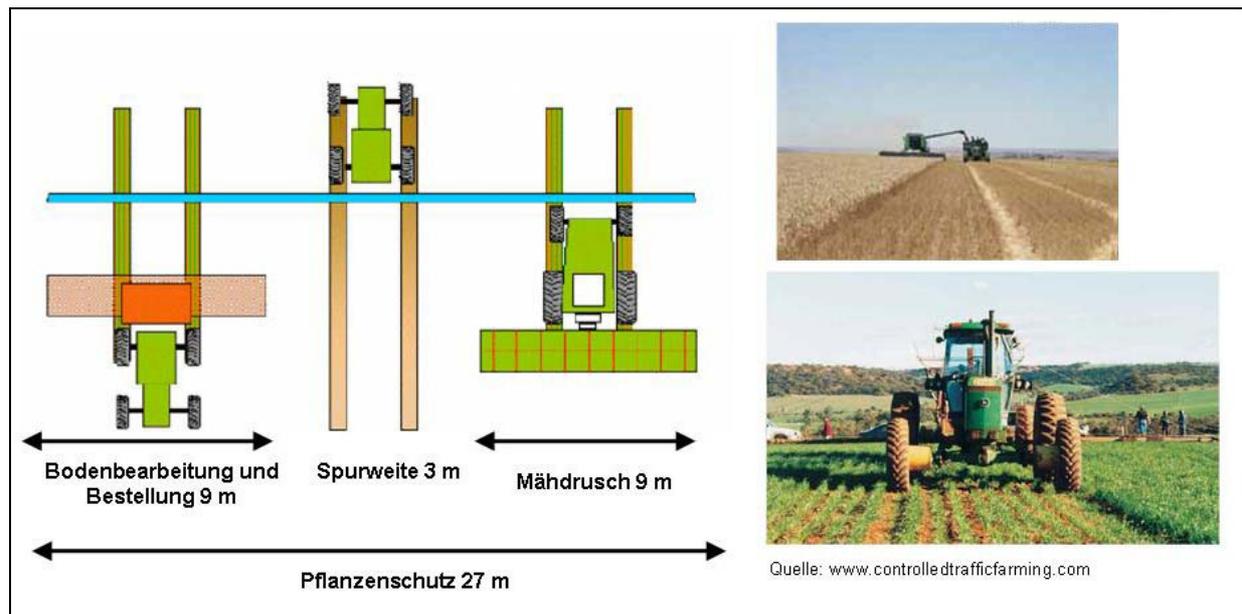


Abbildung 23: Trennung von Spur- und Anbaufläche; Controlled-Traffic-Farming (CTF) „Regel-Fahrspurverfahren“ in Australien

Das Regel-Fahrspur-Verfahren kann als konsequente Umsetzung des Postulats von PROF. E. PERELS (1837 – 1893; Halle und Universität für Bodenkultur Wien; Begründer der landtechnischen Lehre) gewertet werden:

„Es ist durchaus erforderlich, die **Maschinen bestehender Landwirtschaft anzupassen**, nicht aber umgekehrt, **die Landwirtschaft der Maschine**, Versuche welche auf das letztere Ziel hingenen, sind stets gescheitert“.

7. Fazit

Physikalischer Bodenschutz hat einen interdisziplinären Auftrag und erfordert das Zusammenarbeiten der Landtechnik mit den Boden- und Pflanzenbauwissenschaften und insbesondere mit der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung.

Der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und ganz besonders der Schutz des Bodens unterhalb der Pflugsohle kommt angesichts des zeitweiligen Einsatzes schwerer Landmaschinen große Bedeutung zu. Der Unterboden ist für die Pflanzenwurzeln zugänglich zu halten um die Ertragsfähigkeit von Böden auch im Zeichen des Klimawandels langfristig zu sichern. Neben einer Vielzahl von landtechnischen Maßnahmen stellt die bewusste Lastbegrenzung die wirkungsvollste in der Unterbodenschonung dar.

Literatur:

AMA Merkblatt 2007: Cross Compliance. Einhaltung anderweitiger Verpflichtungen. Agrarmarkt Austria.

ANSORGE, D. & R. GODWIN: Soil Management and Profitability. A comparison of the effects of tracks and tyres. Cranfield University Silsoe, 2007

KRAFTFAHRGESETZNOVELLE: 26. KFG-Novelle. 7. Oktober 2005

BERNHARDT ET AL.: Entwicklung der mechanischen Bodenbelastung bei Mähdreschern. In: 61.Jg Landtechnik 5/2006.

BRANDHUBER, R.: Bodenbelastung durch Landmaschinen – Wirkungsmechanismen und Risikobeurteilung. In: Ackerbau vor neuen Herausforderungen. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Schriftenreihe 21 2006. ISSN 1611-4159.

BRUNOTTE, J. & M. WAGNER: Bodenschonung und Kosteneinsparung. Einführung technischer Lösungskonzepte zur Minderung und Vorbeugung von Bodenschutzproblemen in der Pflanzenproduktion. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V (KTBL). KTBL-Schrift 398. 2001. ISBN 3-7843-2129-1.

DIESERENS, E.:TASC (Reifen/Raupen und Bodenverdichtung): FAT, 2004.

DIN V 19688: Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit von Böden aus der Vorbelastung. Vornorm; November 2001.

GESCHEDER, R. & M. DEMMEL: Landtechnische Möglichkeiten zur Vermeidung von schädigenden Bodenbelastungen im Ackerbau. In: Ackerbau vor neuen Herausforderungen. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Schriftenreihe 21 2006. ISSN 1611-4159.

HAMEDINGER, P.: Beurteilung der Druckbelastung auf den Boden durch unterschiedliche Ernteverfahren bei der Zuckerrübenenernte. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien. 2004

HORN, R.: Prognose der mechanischen Belastbarkeit von Böden unter Land- und Forstwirtschaft als Grundlage für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Vortrag am 25. April 2005 an der Universität für Bodenkultur, Wien.

HORN, R.: mündliche Mitteilung, 2006

KÖNIG, G.: Perels und die Dampfbodenkultur. In: Wissenschaftliche Beiträge der Ingenieurhochschule Berlin- Wartenberg; Emil Perels – Begründer landtechnischer Ausbildung. Heft 2/1988.

OLFE, G.: Zur Bodenbelastung durch den Schlepper- und Maschineneinsatz in der pflanzlichen Produktion. In: KTBL-Schrift 362. 1995.

ÖKL: Der Traktor im Straßenverkehr. 7. überarbeitete Auflage. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien ,September 2006.

PÜTZ, M, D. ERDELMANN & L. VOLK: Potentiale im Fahrwerk landwirtschaftlicher Fahrzeuge durch angepassten Reifendruck. In: Landtechnik 2001. VDI-MEG Tagungsband.

RADEMACHER, T. & M. WEIßBACH: Mähdrescher und Bodendruck. Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL). 2004

TASC: Tyres/Tracks And Soil Compaction. Eine PC-Anwendung zur Prävention von Schadverdichtungen in der Praxis. Argoscope FAT Tänikon, 2005

SCHERER, B.: Bodenschutz durch gesetzliche Begrenzung der Radlast landwirtschaftlicher Maschinen?. In: 60. Jg. Landtechnik 2/2005.

SCHLEE, R.: XeoBib - ein neues Traktor-Reifen-Konzept. In: 59(?) Jg. Landtechnik 1/2004.

SIMBRIGER, F.: Wie der Schlepper Gummibeine bekam. In: Miterlebte Landtechnik. MEG-KTBL-Schrift. 1981.

VDI-RICHTLINIE 6101: Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlicher genutzter Böden. Juni 2006. Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI

VON RIENK R. VAN DER PLOEG ET AL.: Schwerelast auf dem Acker. In: Spektrum der Wissenschaft August 2006.

VOLK, L.: Technik, Kosten und Nutzen eines automatischen Reifenreglers für Traktoren und Landmaschinen. In: Landtechnik 2003. VDI-MEG Tagungsband.

WEIßBACH, M.: Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Logos Verlag, Berlin 2004.

WEIßBACH, M.: Zugkraftübertragung und Bodenschonung – ein Widerspruch? Vortrag am ÖKL-Kolloquium 2006 zum Generalthema „Durch richtige Bereifung die Bodenbelastung senken“. 23. November 2007 an der Universität für Bodenkultur Wien.

Autoren:

Dr. Gerhard Moitzi, o.Univ. Prof. Dr. Josef Boxberger

Institut für Landtechnik im Department für nachhaltige Agrarsysteme

Universität für Bodenkultur, Wien

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien