

Einfluß des Treibradschlupfes bei verschiedenen Schleppergeschwindigkeiten auf die Dichte sowie Bodenwasser und Bodenluft eines leichten Bodens

Von Zbigniew Blaszkiewicz, Posen, Polen*)

DK 631.372:625.032.37:631.43

Für den Einsatz und die Weiterentwicklung von Schleppern und Landmaschinen ist es wichtig, den Einfluß verschiedener Schleppereigenschaften auf die in den Fahrspuren auftretenden Bodenverdichtungen zu kennen.

Neben den Schleppereigenschaften wie Achslasten, Reifenart und Reifengröße spielen auch die Größen der Schlepperbewegung Schlupf und Fahrgeschwindigkeit, wie diese Untersuchung zeigt, eine wichtige Rolle für den Grad der Bodenverdichtung, die sich in der Veränderung der Bodendichte, des Porenanteils, der Porengrößenverteilung und der Wasserhalteeigenschaften äußert.

1. Einleitung

Bei den heutigen Verfahren der Bodenbearbeitung, die auf ein Vermeiden schwerer Handarbeit und eine Steigerung von Arbeitsproduktivität und -qualität ausgerichtet sind, entstehen mit dem Einsatz von Schleppern und Geräten viele Probleme. Eins der bis heute ungelösten Probleme ist die Bodenverdichtung beim Einsatz leistungsstarker Schlepper.

Änderungen der Bodendichte und des Wasser- und Luftanteils im Boden unter den Fahrspuren haben unmittelbar eine Ertragsminderung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen zur Folge [1 bis 7].

Der Schlupf der Treibräder ist einer der Faktoren, die diese ungünstigen Veränderungen der physikalischen Bodeneigenschaften bewirken. Bisherige Einsatzversuche zur Klärung der Wirkung des Schlupfes wurden sowohl mit einzelnen Treibrädern [8, 9] als auch mit Schleppern durchgeführt [2, 8, 10 bis 13]. Festgestellt wurde bei diesen Versuchen, daß die vom Schlupf in den Fahrspuren verursachten Veränderungen der physikalischen Bodeneigenschaften auch vom Flächendruck [2], von der Reifenart [8, 11, 12] und von der Schlepperbauart [10, 11, 12] abhängig sind. Vermutet wird, daß im Zusammenwirken mit dem Schlupf auch die Fahrgeschwindigkeit, deren alleiniger Einfluß auf den Bodendruck durch eine Bewegung ohne Schlupf gemessen wurde, von großer Bedeutung ist [14, 15, 16].

Da die landwirtschaftlichen Geräte aufgrund unterschiedlicher betriebstechnischer Forderungen mit unterschiedlichem Schlupf bei verschiedener Fahrgeschwindigkeit eingesetzt werden müssen, ist die Klärung der Zusammenhänge zwischen Schlupf und Fahrgeschwindigkeit einerseits und den Änderungen der Bodendichte und dem Luft- und Wasseranteil des Bodens andererseits in dem ganzen in der Praxis auftretenden Bereich notwendig. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen dann im Zusammenhang mit den Untersuchungen anderer Forscher über die Auswirkungen von Bodenverdichtungen Schlußfolgerungen zu hinsichtlich des Einflusses der Schlepperfahrwerke auf die Bodenverdichtung und die Pflanzenträge.

*) Dr. Z. Blaszkiewicz, Landwirtschaftliche Akademie, Posen.

2. Versuchsziel

Ziel der Versuche ist die Ermittlung des Einflusses, den der Treibradschlupf auf die Bodendichte, den Wasser- und Luftgehalt und die Veränderung der Porengrößenverteilung des Bodens bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten des Schleppers hat.

Mit den Ergebnissen der Praxisversuche und einer Analyse dieser Ergebnisse im Zusammenhang mit anderen Versuchen über die Folgen des Bodendrucks soll der Versuch unternommen werden, den Einfluß der untersuchten Parameter der Schlepperbewegung – Schlupf und Fahrgeschwindigkeit – auf die Änderungen der physikalischen Bodeneigenschaften und damit auf die Bedingungen für das Pflanzenwachstum in den Fahrspuren zu klären.

Die Versuche sollen insbesondere eine Antwort auf die folgenden Fragen bringen:

1. Haben Treibräder mit positivem Schlupf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten wesentliche Änderungen in der Bodendichte, im Wasser- und Luftanteil und in der Porengrößenverteilung zur Folge; sind diese Änderungen bei verschiedenen Schleppergeschwindigkeiten ähnlich?
2. Bei welchen Bodeneigenschaften kommt es unter dem Einfluß des Treibradschlupfes bei verschiedenen Schleppergeschwindigkeiten zu Änderungen und in welchem Verhältnis stehen diese zu den Änderungen der Bodeneigenschaften bei der Ablagerung des Bodens beim Roggenanbau?
3. Bei welchen Werten von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit werden durch die Treibräder des Schleppers die geringsten ungünstigen Änderungen in der Bodendichte und in den das Pflanzenwachstum beeinflussenden Wasser- und Luftanteilen des Bodens in den Fahrspuren verursacht?

3. Versuchsbedingungen

Die Feldversuche wurden auf dem Gebiet der Grundmoräne durchgeführt. Nach der Klassifizierung der Polnischen Bodenkundegesellschaft liegt ein stark sandiger Lehm Boden vor. **Tafel 1** zeigt die Werte wichtiger Bodeneigenschaften während der Messungen. Die Flächen waren gepflügt und gleichzeitig geeeggt. Die Messungen wurden bei einer Bodenfeuchte von 11,2–12 % vorgenommen.

| | | | |
|------------------------------------|-------|-----------|-------------------------|
| 1. Korngrößenverteilung | | | |
| Sand | 1,0 | –0,1 mm | 63 % |
| Feinsand, mittel | 0,1 | –0,05 mm | 18 % |
| Feinsand, fein | 0,05 | –0,02 mm | 2 % |
| Schluff, grob | 0,02 | –0,005 mm | 14 % |
| Schluff, fein | 0,005 | –0,002 mm | 2 % |
| Ton | | <0,002 mm | 1 % |
| 2. Dichte der festen Bodensubstanz | | | 2,61 kg/dm ³ |
| 3. Anteil organischer Substanz | | | 1,034 % |
| 4. Bodenreaktion | | | pH 5,5 |
| 5. Sorptionsvermögen | | | 6,2 mval/100 g |

Tafel 1. Wichtige Bodeneigenschaften des Meßfeldes.

Die Meßergebnisse gelten für den bei den Feldarbeiten eingesetzten Schlepper Ursus C-385 mit einer Nennleistung von 55 kW und einer Masse von 4 190 kg. Die Messungen wurden mit einer zusätzlichen Belastung der Dreipunkt-Kupplung von 500 kg durchgeführt, die für die durchschnittliche Masse der Geräte oder Maschinen am hinteren Teil des Schleppers charakteristisch ist. Der Innendruck in den Hinterreifen mit den Abmessungen 16.9/14-34/8PR betrug 98 kPa und in den Vorderreifen mit den Abmessungen 7.5-20/6PR 196 kPa. Unter diesen Bedingungen beträgt der spezifische Druck der Treibräder auf die Bettung 86,54 kPa und der Vorderräder 119,27 kPa.

Die durch die Schlepperräder verursachten Änderungen der Bodeneigenschaften wurden in der am stärksten verdichteten Zone bis zur Tiefe 15 cm [8, 9, 10] bestimmt.

Die Versuche wurden im Bereich des positiven Schlupfes der Treibräder von 0–40 % bei drei verschiedenen theoretischen Geschwindigkeiten des Schleppers $v_{t1} = 0,49$ m/s, $v_{t2} = 1,65$ m/s und $v_{t3} = 3,03$ m/s durchgeführt. Wegen der begrenzten Zugkraft des Schleppers bei der Geschwindigkeit $v_{t3} = 3,03$ m/s wurden hier nur Messungen im Bereich des Schlupfes von 0–20 % ausgeführt.

Die durch die Schlepperräder veränderten physikalischen Bodeneigenschaften wurden den entsprechenden Eigenschaften für den mechanisch gelockerten Boden vor der Aussaat und für den Zustand nach der Vegetationszeit bei Roggenanbau gegenübergestellt. Der Grad der Bodenverdichtung wurde durch Vergleich mit zwei Grenzwerten der Bodenlockerung charakterisiert:

1. dem Zustand größter Dichte im maximal mit Kapillarkräften des Wassers verdichteten Boden,
2. dem für die lockeren Fraktionen der Bodenaggregate erreichbaren Zustand größter Bodenlockerung.

4. Versuchsmethoden

Die Feldversuche wurden auf dem in einzelne Meßstrecken aufgeteilten Feld durchgeführt, wobei gemäß den Bedingungen im landwirtschaftlichen Versuchswesen die einzelnen Meßstrecken durch den Schlepper Ursus C-385 mit zufällig zugeordneten Werten von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit befahren wurden. Die Zugkraft wurde mit einem hydraulischen Kraftmesser an der Kupplung gemessen, mit dem der Schlepper zum Stehen gebracht wurde.

Der Treibradschlupf und die theoretische Fahrgeschwindigkeit des Schleppers wurden mit einer neuen Filmmethode [17] bestimmt, die unter Mitwirkung des Autors erarbeitet und von ihm modifiziert wurde. Diese Methode ergibt auf kurzen Strecken von etwa 2 m sehr genaue Schlupfmessungen, weil bei den Messungen die aktuellen Werte des sich während des Abbremsens des Schleppers ändernden Rollradius des Treibereifens berücksichtigt werden. Der aktuelle Wert des Rollradius wird mit einem nach dem Entwurf des Verfassers gebauten Gerät gemessen.

Die Bestimmung des genauen Schlupfwertes auf einer jeweils kurzen Strecke der Fahrspur machte es möglich, die funktionalen Abhängigkeiten zwischen dem Treibradschlupf und den untersuchten physikalischen Bodeneigenschaften durch Entnahme und Analyse einer geringen Anzahl von Bodenproben festzustellen [18].

Die Bodenproben wurden mit 100 cm³-Stechzylindern nach *v. Nitzsch* aus einer Tiefe von 0,05–0,10 m, gemessen vom Grund der Fahrspur, entnommen, und zwar jeweils 7 Proben für jede der 3 Wiederholungen der vorgegebenen Kombinationen von Fahrgeschwindigkeit und Schlupf.

Die Eigenschaften für den mechanisch gelockerten Boden zur Zeit der Versuche und für den abgelagerten Boden nach der Vegetationszeit des Roggens wurden ebenfalls mit 100 cm³-Stechzylindern bestimmt, wozu an 5 zufällig bestimmten Stellen des Feldes Bodenproben aus den Tiefen 0,05–0,10 m, 0,15–0,20 m und 0,25 bis 0,30 m entnommen wurden.

Die physikalischen Bodeneigenschaften der Proben wurden mit in der Bodenkunde allgemein anerkannten Methoden bestimmt: Die Dichte der reinen trockenen Bodensubstanz mit der Pyknometermethode, die Rohdichte (Dichte unter Einschluß des Porenvolumens) und die Feuchtigkeit mit der Trocken-Wäge-Methode.

Die Bodenwasser-Werte wurden gemessen als Feldkapazität bei einem Saugwert des Bodens von pF 2,0 (entsprechend einem Unterdruck von 100 cm Wassersäule = 981 Pa) und als Wasserkapazität bei Beginn der Pflanzenwuchshemmung bei einem Saugwert des Bodens von pF 2,7 (entsprechend einem Unterdruck von 500 cm Wassersäule = 4905 Pa). Die entsprechenden Wassergehalte werden als volum. Wassergehalt (Wasservolumen bezogen auf Probenvolumen) $\Theta_{2,0}$; $\Theta_{2,7}$ und als grav. Wassergehalt (Wassermasse bezogen auf Masse des trockenen Bodens) $w_{2,0}$, $w_{2,7}$ angegeben.

Das Porenvolumen der einzelnen Bodenporenklassen mit einem Durchmesser $> 300 \mu\text{m}$, $95\text{--}300 \mu\text{m}$, $30\text{--}95 \mu\text{m}$, $12\text{--}30 \mu\text{m}$, $6\text{--}12 \mu\text{m}$ und $< 6 \mu\text{m}$ wird mit Hilfe von keramischen Saugplatten nach der von *Trzecki u.a.* [19] angegebenen Methode von *Richards* bestimmt und als Volumenanteil am Gesamtprobenvolumen angegeben.

Die Luftkapazität wird als Differenz aus dem Gesamtporenanteil und der Feldkapazität (volum. Wassergehalt bei pF 2,0) errechnet, damit läßt sich auch das Verhältnis Luftkapazität : Feldkapazität ($n_{L,2,0} : \Theta_{2,0}$) bestimmen.

Der für die Pflanzen leicht zugängliche Wassergehalt w_z wird als Differenz der grav. Wassergehalte bei Feldkapazität (pF 2,0) und bei Beginn der Pflanzenwuchshemmung (pF 2,7) angenommen.

Die Korngrößenanalyse wurde mit der aerometrischen Methode nach *Casagrande* in der Modifikation nach *Proszynski* durchgeführt.

Der Wert der maximalen Bodendichte wurde mit dem aus der Bodenmechanik bekannten *Proctor*-Test, abgewandelt nach Prof. *Rzasa*, durch Verdichten von Proben mit steigendem Wassergehalt bestimmt. Die maximale Dichte des Versuchsbodens (stark lehmiger Sand) wurde bei einem grav. Wassergehalt von 13,3–14,7 % erreicht.

Den Wert der geringsten Bodendichte erhielt man aus Schüttungen der Korngrößenfraktionen 1–7 mm in Zylindern mit 1 dm³ Inhalt, wozu die gewählten Fraktionen durch Absieben aus luftgetrockneten Proben des Versuchsbodens gewonnen wurden.

5. Auswertung der Versuche

Die bei den Versuchen erreichten Werte der Bodeneigenschaften, der Bodendichte ρ , des Porenanteils n , der Wassergehalte bei Feldkapazität $\Theta_{2,0}$ und $w_{2,0}$, der Wassergehalte bei Beginn der Pflanzenwuchshemmung $\Theta_{2,7}$ und $w_{2,7}$, der Luftkapazität $n_{L,2,0}$ und der Porenanteile der verschiedenen Porengrößenklassen $n_1 \dots n_6$, wurden für die einzelnen theoretischen Fahrgeschwindigkeiten v_{t1} , v_{t2} , v_{t3} zusammengestellt und mit Hilfe einer Regressionsrechnung [20] als Funktion des Schlupfes in Form von Polynomen dargestellt.

Der für die Pflanzen leicht zugängliche Wassergehalt wird als Differenz der jeweiligen Polynomwerte für die Wassergehalte $w_{2,0}$ und $w_{2,7}$ berechnet. Die ermittelten funktionalen Abhängigkeiten sind als Diagramme in **Bild 1 bis 15** dargestellt, die Polynome in den Bildunterschriften angegeben.

Zur Veranschaulichung und zur Erleichterung der Analyse der Versuchsergebnisse sind in **Bild 1** als waagerechte Linien die Werte der maximalen und minimalen Bodendichte (ρ_{max} , ρ_{min}) und die Werte des gelockerten Bodens (ρ_{Best}) sowie des abgelagerten Bodens (ρ_{Ernte}) eingetragen. In gleicher Weise sind in **Bild 2** die Werte des Porenanteils für diese 4 Bodenzustände angegeben, während in den weiteren Darstellungen nur jeweils die Werte für den gelockerten Boden (Index Best.) und den abgelagerten Boden (Index Ernte) aufgetragen sind.

Die im Versuch ermittelten Werte der Zugkraft F des Schleppers sind für charakteristische Werte des Schlupfes der Treibräder in **Bild 1** aufgeführt.

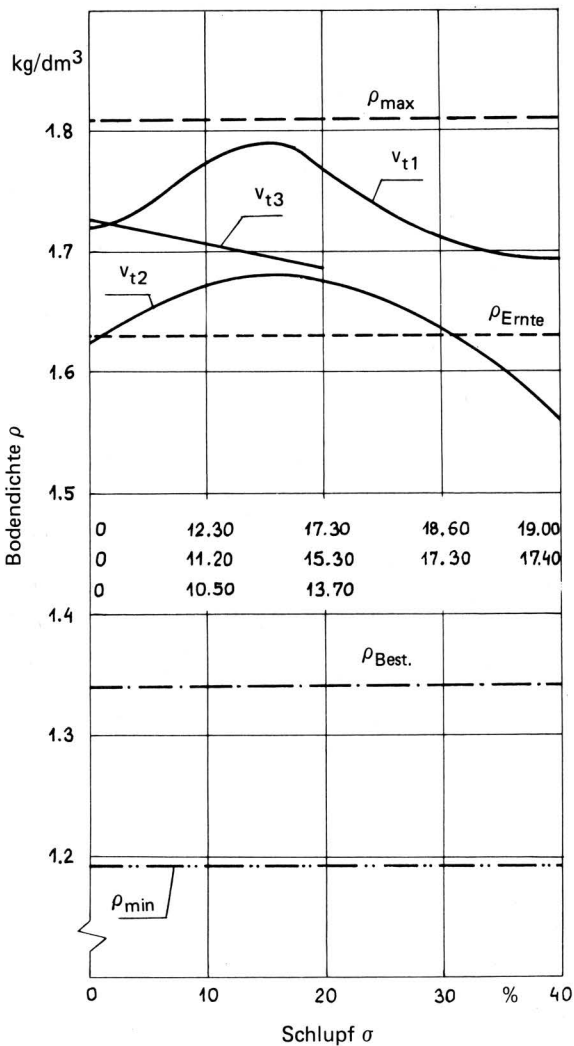


Bild 1. Bodendichte unter den Fahrspuren und Zugkraft in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreibräder bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; \rho = 1,7208 - 0,0038 \sigma + 0,0020 \sigma^2 - 0,00008 \sigma^3 \text{ (kg/dm}^3\text{)}$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; \rho = 1,6252 - 0,0068 \sigma - 0,0002 \sigma^2 \text{ (kg/dm}^3\text{)}$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; \rho = 1,7260 - 0,0022 \sigma \text{ (kg/dm}^3\text{)}$$

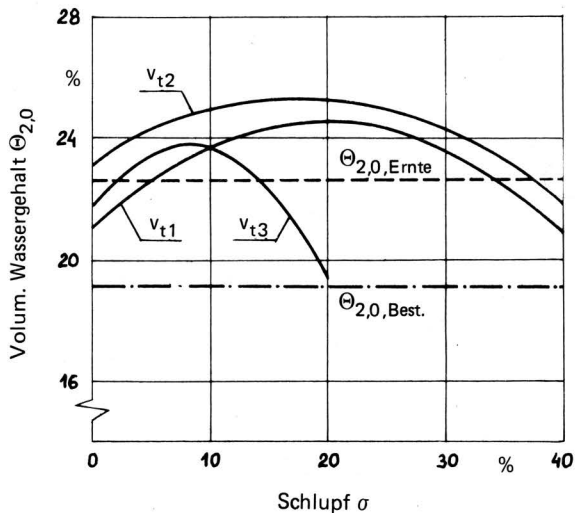


Bild 3. Volum. Wassergehalt bei pF 2,0 (Feldkapazität) in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreibräder bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; \Theta_{2,0} = 21,1000 + 0,3475 \sigma - 0,0088 \sigma^2 \text{ (%)}$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; \Theta_{2,0} = 23,2288 + 0,2484 \sigma - 0,0068 \sigma^2 \text{ (%)}$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; \Theta_{2,0} = 21,7444 + 0,5124 \sigma - 0,0315 \sigma^2 \text{ (%)}$$

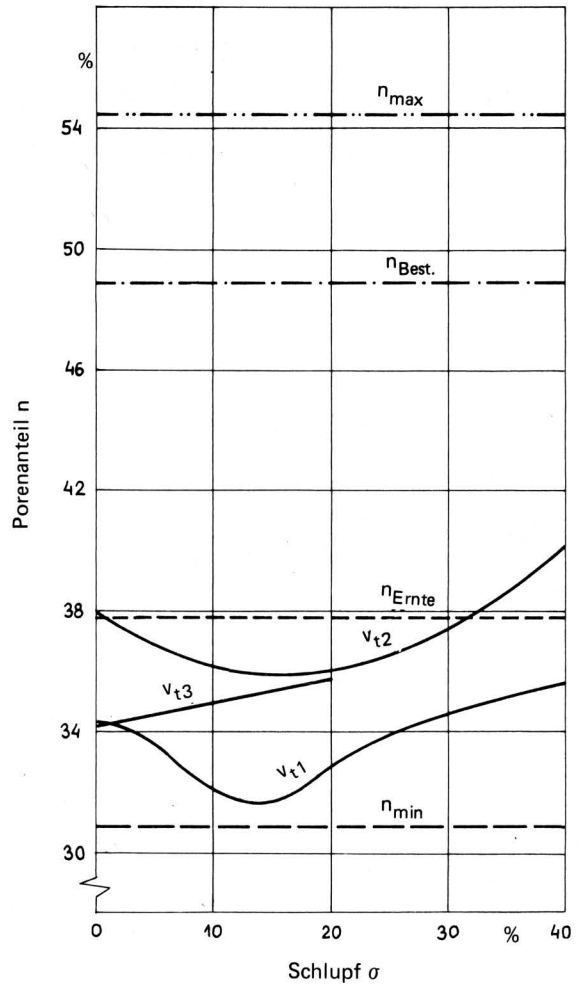


Bild 2. Gesamter Porenanteil in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreibräder bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n = 33,9148 + 0,0149 \sigma - 0,4016 \sigma^2 + 0,0367 \sigma^3 - 0,0011 \sigma^4 \text{ (%)}$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n = 38,0029 - 0,2638 \sigma + 0,0083 \sigma^2 \text{ (%)}$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n = 34,1234 + 0,0816 \sigma \text{ (%)}$$

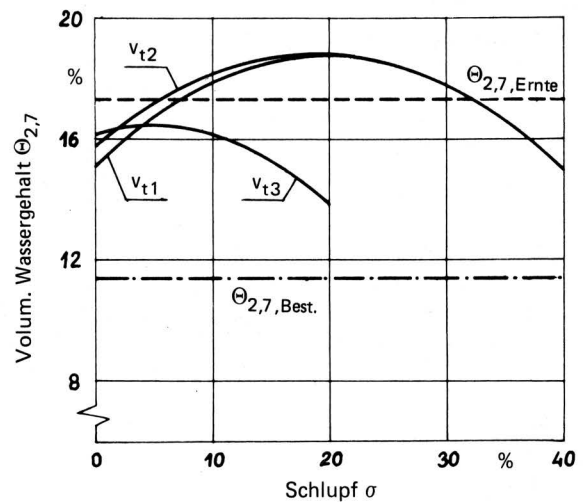


Bild 4. Volum. Wassergehalt bei Beginn der Hemmung des Pflanzenwachstums (pF 2,7) in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreibräder bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; \Theta_{2,7} = 15,1601 + 0,3604 \sigma - 0,0090 \sigma^2 \text{ (%)}$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; \Theta_{2,7} = 15,6725 + 0,3296 \sigma - 0,0087 \sigma^2 \text{ (%)}$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; \Theta_{2,7} = 16,2617 + 0,1348 \sigma - 0,0126 \sigma^2 \text{ (%)}$$

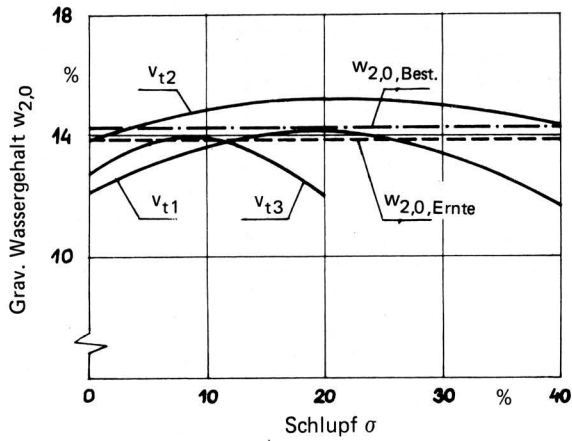


Bild 5. Grav. Wassergehalt bei pF 2,0 (Feldkapazität) in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreiber bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; w_{2,0} = 12,1181 + 0,2093 \sigma - 0,0056 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; w_{2,0} = 13,8339 + 0,1339 \sigma - 0,0030 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; w_{2,0} = 12,7203 + 0,2785 \sigma - 0,0162 \sigma^2 (\%)$$

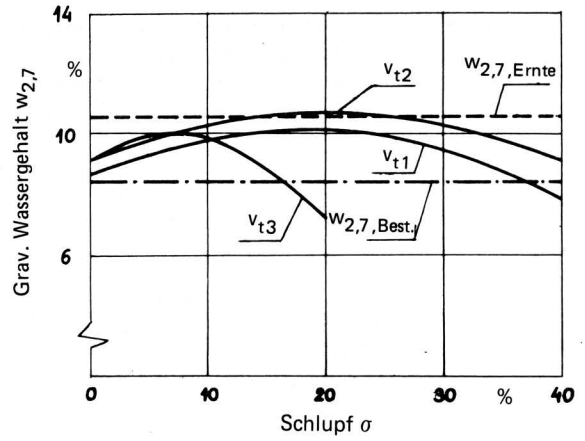


Bild 6. Grav. Wassergehalt bei Beginn der Hemmung des Pflanzenwachstums (pF 2,7) in Abhängigkeit vom Schlupf der Schleppertreiber bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; w_{2,7} = 8,6415 + 0,1641 \sigma - 0,0046 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; w_{2,7} = 9,2244 + 0,1612 \sigma - 0,0041 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; w_{2,7} = 9,0230 + 0,3316 \sigma - 0,0242 \sigma^2 (\%)$$

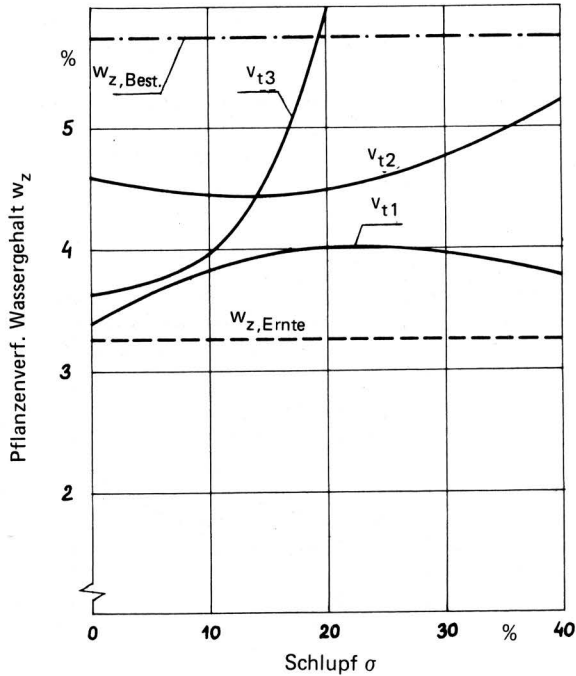


Bild 7. Für die Pflanzen leicht zugänglicher grav. Wassergehalt in Abhängigkeit vom Schlupf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

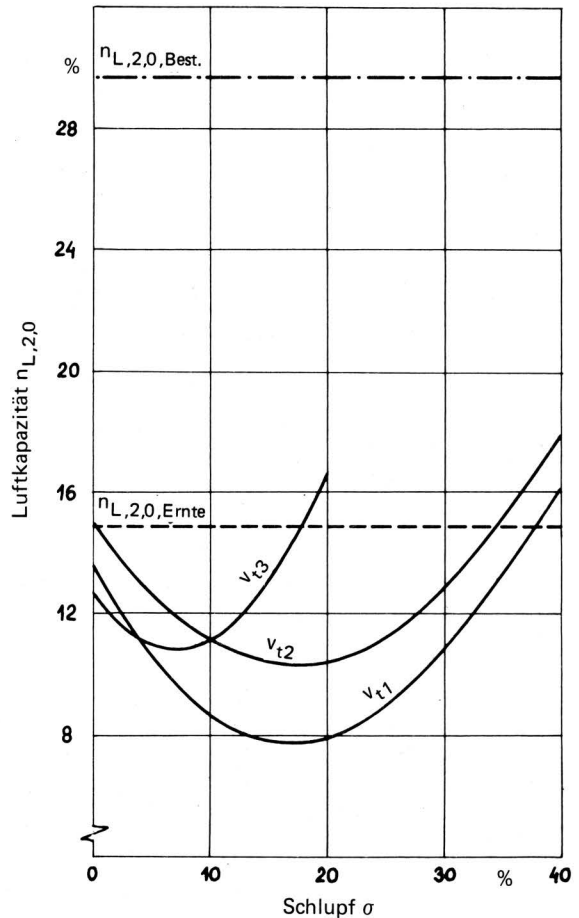


Bild 8. Luftkapazität, Volumenanteil der luftgefüllten Poren bei Feldkapazität (pF 2,0), in Abhängigkeit vom Treibradschlupf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_{L,2,0} = 13,4833 - 0,6634 \sigma + 0,0191 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_{L,2,0} = 14,9937 - 0,0533 \sigma + 0,0005 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_{L,2,0} = 12,4553 - 0,4653 \sigma + 0,0336 \sigma^2 (\%)$$

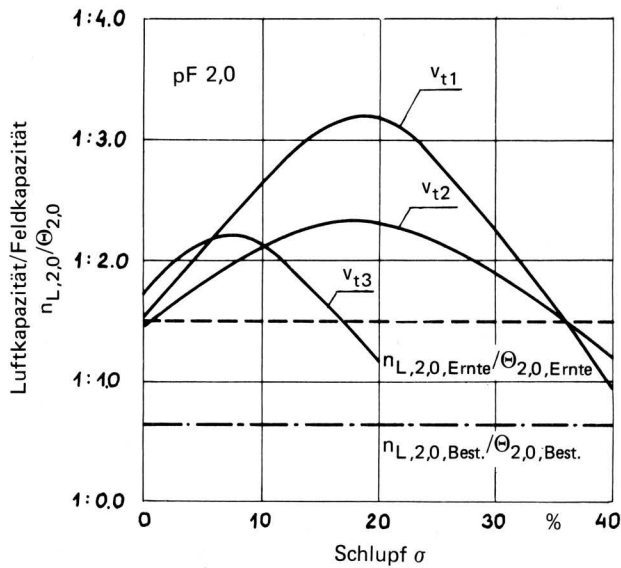


Bild 9. Luftkapazität/Feldkapazität ($n_{L,2,0}/\Theta_{2,0}$), Verhältnis von luft- und wassergefülltem Porenvolumen bei pF 2,0, in Abhängigkeit vom Treibradschlupf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

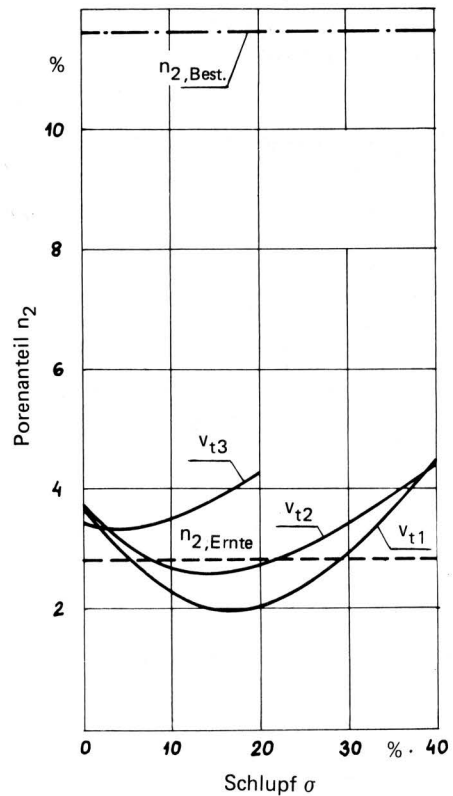


Bild 11. Volumenanteil n_2 für Poren der Größe 95–300 μm .
 $v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_2 = 3,7343 - 2,0215 \sigma + 5,7929 \sigma^2$ (%)
 $v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_2 = 3,7497 - 0,1766 \sigma + 0,0001 \sigma^2 - 0,0001 \sigma^3$ (%)
 $v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_2 = 3,4363 - 0,0398 \sigma + 0,0043 \sigma^2$ (%)

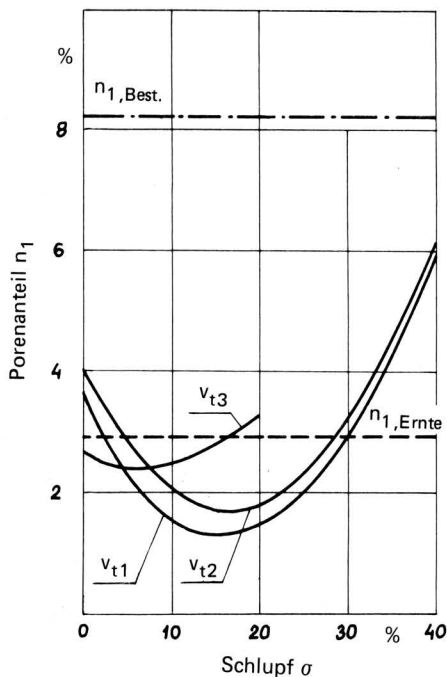


Bild 10 bis 15. Volumenanteil der Poren unterschiedlicher Porengröße in Abhängigkeit vom Treibradschlupf bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Bild 10. Volumenanteil n_1 für Porengröße $> 300 \mu\text{m}$.
 $v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_1 = 3,1673 - 2,8840 \sigma + 8,9446 \sigma^2$ (%)
 $v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_1 = 4,0603 - 0,2838 \sigma + 0,0084 \sigma^2$ (%)
 $v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_1 = 2,6805 - 0,0804 \sigma + 0,0060 \sigma^2$ (%)

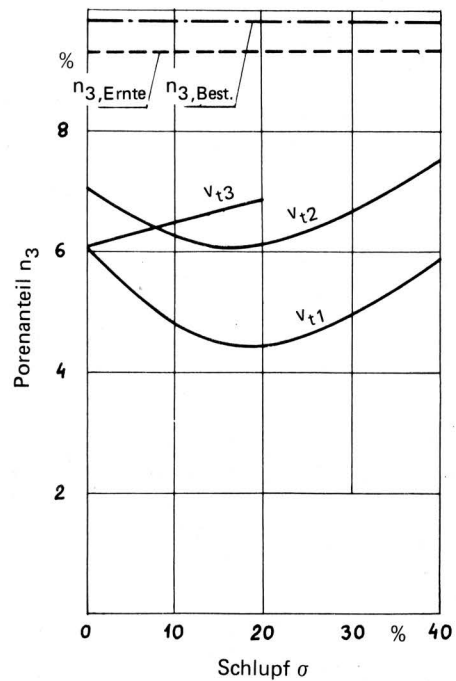


Bild 12. Volumenanteil n_3 für Poren der Größe 30–95 μm .
 $v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_3 = 6,1309 - 0,1687 \sigma + 0,0042 \sigma^2$ (%)
 $v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_3 = 6,9682 - 0,0973 \sigma + 0,0027 \sigma^2$ (%)
 $v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_3 = 6,1044 + 0,0372 \sigma$ (%)

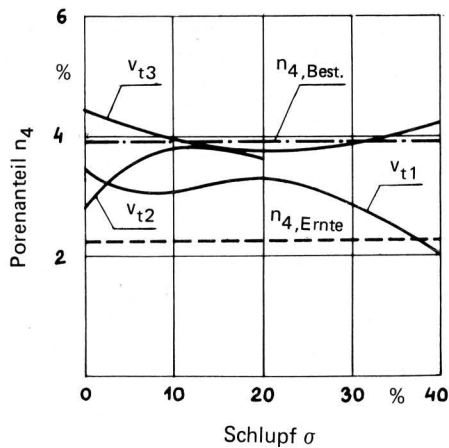


Bild 13. Volumenanteil n_4 für Poren der Größe 12–30 μm .

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_4 = 3,4343 - 0,1068 \sigma + 0,0050 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_4 = 4,4699 - 0,0645 \sigma + 0,0015 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_4 = 2,8338 + 0,1555 \sigma - 0,0064 \sigma^2 (\%)$$

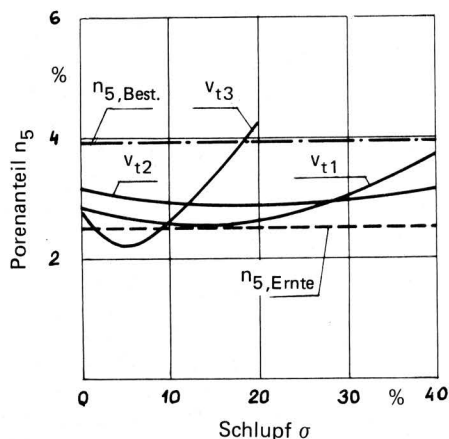


Bild 14. Volumenanteil n_5 für Poren der Größe 6–12 μm .

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_5 = 2,8403 - 4,5393 \sigma - 1,7599 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_5 = 3,1571 - 0,0298 \sigma - 0,0007 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_5 = 2,8632 - 0,3276 \sigma - 0,0416 \sigma^2 - 0,0012 \sigma^3 (\%)$$

6. Analyse der Versuchsergebnisse

Die durchgeführte statistische Analyse hat gezeigt, daß die ermittelten mathematischen Funktionen sehr gut die Zusammenhänge zwischen dem Treibradschlupf und den Eigenschaften des Versuchsbodens in den Schlepperspuren bei jeder der untersuchten theoretischen Fahrgeschwindigkeiten wiedergeben. Der Verlauf der in den Diagrammen dargestellten Abhängigkeiten weist darauf hin, daß die Bewegung der Schleppertreibräder mit positivem Schlupf auf dem gelockerten Boden wesentliche Veränderungen der Bodendichte, des Luft- und Wassergehalts im Boden und in der Porengrößenverteilung verursachen.

Bei der untersuchten Fahrgeschwindigkeit v_{t1} bewirken die Schleppertreibräder die größten Veränderungen der Bodendichte (Bild 1), des maximalen Wassergehalts, der mit gewissen Einschränkungen dem Porenanteil (Bild 2) entspricht, aber auch der Luftkapazität (Bild 8), des Verhältnisses Luftkapazität : Feldkapazität (Bild 9) und des Porenanteils in den Porengrößenklassen $> 300 \mu\text{m}$, $95\text{--}300 \mu\text{m}$, $30\text{--}95 \mu\text{m}$ und $< 6 \mu\text{m}$ (Bild 10, 11, 12 und 15). Das durch den volum. Wassergehalt $\Theta_{2,0}$ und $\Theta_{2,7}$ (Bild 3 und 4) bzw. den grav. Wassergehalt $w_{2,0}$ und $w_{2,7}$ (Bild 5 und 6) charakterisierte Wasserbindungsvermögen hat sich auch geringfügig verän-

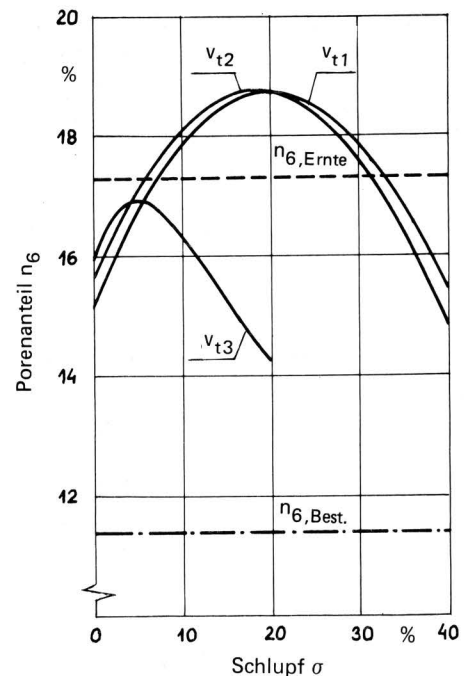


Bild 15. Volumenanteil n_6 für Poren der Größe $< 6 \mu\text{m}$.

$$v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}; n_6 = 15,1300 - 3,6085 \sigma - 9,0224 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t2} = 1,65 \text{ m/s}; n_6 = 15,6724 + 0,3296 \sigma - 0,0087 \sigma^2 (\%)$$

$$v_{t3} = 3,03 \text{ m/s}; n_6 = 16,0500 + 0,6056 \sigma - 0,1653 \sigma^2 + 0,2130 \sigma^3 - 0,0014 \sigma^4 (\%)$$

dert. Auch der den Pflanzen zugängliche Wassergehalt (Bild 7) verändert sich als Folge der Veränderungen des Porenvolumenanteils in den Porengrößenklassen 12–30 μm und 6–12 μm (Bild 13 und 14).

Die genannten Bodeneigenschaften verändern sich unter dem Einfluß der untersuchten Parameter Schlupf σ und Fahrgeschwindigkeit v_{t1} im gleichen Grade wie beim nicht befahrenen Boden während der gesamten Vegetationszeit der Kulturpflanzen. Die Schlepperräder verursachen beim Befahren des gelockerten Bodens mit relativ großem Wassergehalt (wie im Frühjahr bei Beginn der Vegetation) in den Fahrspuren also im allgemeinen solche Werte der Bodendichte und der Luft- und Wasseranteile, wie sie sonst meist erst am Ende der Vegetationszeit zu finden sind. Bei manchen Parameterkombinationen von σ und v_{t1} werden aber auch noch ungünstigere Bedingungen geschaffen.

Aus vielen anderen Arbeiten über die Abhängigkeit des Pflanzenertrags von den genannten Bodeneigenschaften [1, 3, 4, 5, 6, 21] ist bekannt, daß die Bedingungen für das Pflanzenwachstum in den Fahrspuren nicht optimal sind, sie weichen vielmehr vom Optimalwert in hohem Maße ab. Das gilt hier für den gesamten Bereich des Schlupfes, und vor allem für $\sigma = 10\text{--}20 \%$ bei der kleinsten untersuchten Fahrgeschwindigkeit $v_{t1} = 0,49 \text{ m/s}$.

Bei diesen Parametern wird die Bodendichte größer als die für das Pflanzenwachstum als optimal angemessene ($\rho = 1,45 \text{ kg/dm}^3$) [6, 21], die Luftkapazität (Bild 8) nimmt Werte an, die die für die meisten Pflanzen kritische Luftkapazität $n_{L,2,0} = 15 \%$ [3] deutlich unterschreiten bei einem äußerst ungünstigen Verhältnis Luftkapazität : Wasserkapazität.

Wegen der insgesamt geringen Änderungen des volum. Wassergehalts, die in Sandböden auftreten können, was sich auch in den Versuchen zeigte, sind Änderungen dieser Größe für das Pflanzenwachstum von großer Bedeutung [3 bis 8]. Die Werte von $\Theta_{2,0}$ und $\Theta_{2,7}$ (Bild 3 und 4) wurden nicht ungünstig beeinflusst. Der den Pflanzen zugängliche Wassergehalt blieb im Bereich zwischen $w_{z, \text{Best.}}$ und $w_{z, \text{Ernte}}$.

Für die zuvor aufgezeigten ungünstigen Parameter $\sigma = 10\text{--}20\%$ und $v_{t1} = 0,49\text{ m/s}$ ist die Annäherung der Bodendichte in den Fahrspuren an den Zustand größter Dichte (Differenz nur 4%) sehr deutlich. In bezug auf die damit in den Fahrspuren für das Pflanzenwachstum geschaffenen Bedingungen ist daraus der Schluß zu ziehen, daß der Schlepper vor allem bei einer Zugkraft $F = 12\text{--}18\text{ kN}$ und einer Kriechgeschwindigkeit von etwa $v_t = 0,5\text{ m/s}$ nicht eingesetzt werden sollte. Unter solchen Bedingungen bei einem grav. Wassergehalt $w = 11\text{--}12\%$ ist es nicht zu empfehlen, den Boden mit Schleppern zu befahren, die dem Typ Ursus C-385 ähnlich sind.

Festgestellt wurde, daß die durch den Schlepper bedingten Bodenverdichtungen bei der mittleren theoretischen Fahrgeschwindigkeit $v_{t2} = 1,65\text{ m/s}$ am geringsten sind, vor allem bei Schlupfwerten nahe 0% und über 30% . Dies ist für die landwirtschaftliche Praxis von großer Bedeutung, weil die meisten Bodenbearbeitungsvorgänge und Pflegearbeiten mit Geschwindigkeiten im Bereich um etwa $1,6\text{ m/s}$ durchgeführt werden.

Ein Einsatz des Schleppers bei Schlupfwerten $\sigma > 30\%$, der mit der dann geringeren Bodenverdichtung zu begründen wäre, ist allerdings wegen des Absinkens der Flächenleistung, des Steigens des Kraftstoffverbrauchs und des Anwachsens des Reifenverschleißes nur begrenzt möglich.

Bei der Geschwindigkeit $v_{t3} = 3,03\text{ m/s}$ werden Bodendichte und Porenanteil mit steigendem Schlupf zunehmend weniger beeinflusst. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß der Schlepper Ursus C-385 – und Schlepper mit ähnlichen technischen Parametern – den lockeren Boden mit solchen Geschwindigkeiten befahren können, was zu höherer Flächenleistung der Arbeitsgeräte führt. Soweit eine Steigerung der Flächenleistung auch über eine Vergrößerung der Arbeitsbreite erfolgt, ergeben sich größere Zugkräfte, die einen größeren Schlupf der Treibräder (Bild 1) bedingen.

7. Diskussion der Versuchsergebnisse

Es ist nicht einfach, die Auswirkungen der Treibräder landwirtschaftlicher Schlepper auf die Dichte sowie Wasser- und Luftgehalt des Bodens bei unterschiedlichen Werten von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit eindeutig zu erklären.

Die Analyse dieses Problems weist darauf hin, daß es nur in einem Vergleich der Auswirkungen der Schleppertreibräder auf den Boden mit den Ergebnissen aus simulierten Verdichtungsversuchen mit Einschluß von Verformungen unter den Vorsprüngen der Reifenlauffläche in besonderen Apparaturen geklärt werden kann, wobei *Raghavan u.a.* [11, 12] schon verhältnismäßig gute Analogien der verschiedenen Vorgänge erreicht haben.

Bei Verständnis der auf die Treibräder wirkenden Kräfte scheint die Klärung dieses Problems allein über Versuche mit einer Einzelrad-Meßvorrichtung [8, 9] nicht möglich, da die Versuchsergebnisse für die physikalischen Bodeneigenschaften nicht direkt mit den durch die Schleppertreibräder bewirkten Ergebnissen vergleichbar sind.

Eine Änderung des Schlupfes der Treibräder, durch wechselnde Zugwiderstandskräfte der landwirtschaftlichen Geräte und Maschinen bedingt, verursacht gleichzeitig eine unbeabsichtigte Änderung anderer Parameter, die den Bodendruck beeinflussen. Während der Fahrt ändert sich der Druck in der Aufstandsfläche der Treib- und Vorderräder wegen der wechselnden Belastung der Schlepperhinterachse, die sich unter dem Einfluß der Zugwiderstände verändert. Die Fahrgeschwindigkeit wird proportional mit wachsendem Schlupf der Treibräder vermindert. Obwohl die Fahrgeschwindigkeit sehr einfach zu messen ist, erlauben es methodische Schwierigkeiten nicht, den während der Fahrt veränderlichen Druck in der Aufstandsfläche der Räder genau zu bestimmen, wie die Arbeiten über entsprechende Methoden und Meßvorrichtungen zeigen. Um Ergebnisse zu erzielen, wie sie der Praxis bei Feldbedingungen während der Schlepperarbeit entsprechen, wurden hier die Versuche bei fest vorgegebenen theoretischen (vom Schlupf unabhängi-

gen) Fahrgeschwindigkeiten des Schleppers bei veränderlichem Schlupf durchgeführt und die Ergebnisse auf den jeweiligen Schlupf bezogen.

Die Schwierigkeiten bei der Erklärung der durch den Schlepper bei den Variablen σ und v_t verursachten Bodenverdichtung und der Unterschiede in den Bodenproben beruhen auf den zu geringen Kenntnissen über die Abhängigkeiten der Normal- und Schubspannungen und über das Bodengefüge, das sich unter dem Einfluß der elastischen Reifen ändert.

Der Vorgang ist dadurch so kompliziert, daß Vorsprünge der Reifenlauffläche in ihrer Vertiefung den Boden abscheren, was zu waagerechten Bodenverformungen führt. Die bisher praktisch nicht bestimmte, wahrscheinlich einer Zyklode ähnliche Bewegung von Punkten der Reifentragfläche verursacht ein Zerdrücken des Bodens. Sowohl das Verdichten wie das Abscheren des Bodens treten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf, die von der theoretischen Fahrgeschwindigkeit des Rades abhängig sind und sich gleichzeitig mit Änderungen des Radschlupfes verändern.

Für die Schaffung von Reifen, die den Forderungen nach guten Triebkrafteigenschaften und geringer Bodenverdichtung entsprechen, scheint es richtig zu sein, die genannten Abhängigkeiten mit der analytischen Methode zu klären und entsprechende Versuche durchzuführen. Die in dieser Arbeit dargestellten Versuche erweitern die Kenntnisse auf diesem Gebiet und erlauben, die für die Landwirtschaft wichtigen Parameter der Schlepperbewegung im Hinblick auf den Abbau der Bodenverdichtung zu bestimmen.

Die Ergebnisse bestätigen die Rolle des Bodenwassers bei der Veränderung der Poren und der Luft- und Wasseranteile während der durch die Schlepperräder verursachten Bodenverdichtung. Für die größeren Geschwindigkeiten der Bodenverdichtung wurde festgestellt, daß hier die Wasserbewegung von größter Bedeutung ist. Bei den Versuchsbedingungen (grav. Wassergehalt $w = 11,2\text{--}12\%$) liegt Wasser auch in den Poren mit einem Durchmesser über $30\text{ }\mu\text{m}$ vor. Bei einer Steigerung der Schleppergeschwindigkeit bis v_{t2} wird die durch die Räder ausgelöste Wasserverdrängung und die Verlagerung des Wassers in weniger verdichtete Bereiche durch die begrenzte Strömungsgeschwindigkeit in den Poren begrenzt. Das nicht verdrängte, die Poren bis $95\text{ }\mu\text{m}$ ausfüllende Wasser überträgt die durch die Schlepperräder bedingten Belastungen, wobei die Zerstörung dieser Poren ($12\text{--}95\text{ }\mu\text{m}$, Bild 12 und 13) begrenzt ist. Ganz zerstört wurden die mit Luft gefüllten Grobporen. Die Steigerung der Geschwindigkeit bis v_{t3} ergibt keine deutlichen Änderungen dieser Wirkungen des Rades.

8. Praktische Bedeutung der Versuchsergebnisse

Die in den Versuchen festgestellten ungünstigen Veränderungen in der Bodendichte und dem Luft- und Wassergehalt des Bodens weisen darauf hin, daß landwirtschaftliche Schlepper mit ähnlichen Parametern wie der Ursus C-385 bei so hoher Bodenfeuchte (grav. Wassergehalt $w = 11\text{--}12\%$) nicht für Feldarbeiten eingesetzt werden sollten. Die Notwendigkeit zur fristgerechten Arbeiterledigung zwingt daher zur Erarbeitung und Anwendung anderer technischer Lösungen und zur Abänderung der gegenwärtigen Fahrwerke in der Weise, daß sie keine ungünstigen Verdichtungen des Bodens ergeben. Aus dieser Sicht sollten die Schlepper auch mit solchen Werten von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit betrieben werden, bei denen die Verdichtung gering gehalten werden konnte. Um einen Einsatz der Schlepper unter diesen Bedingungen und bei Ausnutzung der Zugeigenschaften zu ermöglichen, scheint es notwendig, die Schlepper mit besonders für diesen Zweck erarbeiteten Geräten auszurüsten.

9. Schlußfolgerungen

1. Der Schlupf der Schleppertreibräder hat einen großen Einfluß auf die Bodendichte, den Luft- und Wassergehalt sowie die Porengrößenverteilung im Boden, wobei Art und Umfang der Veränderungen dieser Eigenschaften von der Fahrgeschwindigkeit des Schleppers abhängig sind.
2. Im untersuchten Bereich von Treibradschlupf und Fahrgeschwindigkeit wurden die größten Änderungen festgestellt bei der Bodendichte, dem Porenanteil, der Luftkapazität, bei dem Verhältnis Luftkapazität : Feldkapazität und beim Porenvolumen für die Porendurchmesser $> 300 \mu\text{m}$, $95\text{--}300 \mu\text{m}$; $30\text{--}95 \mu\text{m}$ und $< 6 \mu\text{m}$. Geringere Änderungen wurden in den Fahrspuren ermittelt für die Feldkapazität und den Wassergehalt bei Beginn der Hemmung des Pflanzenwachstums (pF 2,7). Das Porenvolumen der Porengruppen $6\text{--}12 \mu\text{m}$ und $12\text{--}30 \mu\text{m}$ zeigte die geringsten Veränderungen.
3. Die im Hinblick auf die Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen geringsten, ungünstigen Änderungen der Dichte sowie Luft- und Wassergehalte des Bodens werden bei der theoretischen Fahrgeschwindigkeit $v_t = 1,65 \text{ m/s}$ bei Schlupfwerten nahe 0 und über 25 % gemessen.
4. Mit den bisher verwendeten Rädern sollten auf mechanisch gelockertem Boden Schlepper nicht mit der Kriechgeschwindigkeit von etwa $0,5 \text{ m/s}$ eingesetzt werden, weil die Treibräder dann im gesamten Bereich des Schlupfes sehr starke Änderungen der Dichte sowie der Luft- und Wassergehalte des Bodens verursachen.
5. Die geringeren ungünstigen Änderungen der Dichte sowie der Luft- und Wassergehalte des Bodens in den Fahrspuren bei höheren Werten von Fahrgeschwindigkeit und Schlupf der Schleppertreibräder weisen darauf hin, daß die Erhöhung der Flächenleistung landwirtschaftlicher Geräte nur auf dem Weg einer Steigerung der Fahrgeschwindigkeit und gleichzeitig der Arbeitsbreite stattfinden kann.
6. Die bei dem grav. Wassergehalt von 11–12 % durch die Schlepperräder auf mechanisch gelockertem Boden verursachten Änderungen der Dichte sowie der Luft- und Wassergehalte des Bodens sind im ganzen Bereich von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit ungünstiger als die während der Vegetationszeit durch Ablagerung entstehenden Änderungen. Daraus ist zu schließen, daß neben der Auswahl geeigneter Einsatzbedingungen (auch bezüglich Schlupf und Geschwindigkeit) bei den zur Zeit verwendeten Schlepperfahrwerken andere technische Lösungen angestrebt werden sollten, mit denen der Boden weniger verdichtet wird.

Schrifttum

- [1] Barnes, K.K., W.M. Carleton, W.M. Taylor, R.J. Throckmorton u. G.E. Vanden Berg: Compaction of agricultural soils. ASAE Monographie 1971.
- [2] Blaszkiewicz, Z.: Einfluß des Schlupfes und des Flächen-drucks der Schleppertreibräder auf die Verdichtung und Luft-Wasser-Eigenschaften des leichten Bodens. (Orig. Poln.) Roczniki Nauk Rolniczych, Seria C, im Druck.
- [3] Dolgow, S.J. u. S.A. Modina: Einige Regelmäßigkeiten bei den Abhängigkeiten des Kulturpflanzenwachstums von der Bodenverdichtung. (Orig. Poln.) Teoret. Wopr. Obrab. Poc, 1969, Nr. 2, S. 54/64.
- [4] Kozicz, J.: Einfluß veränderlichen Schleppergewichts auf die physischen Bodeneigenschaften und auf das Wachstum einiger Pflanzen. (Orig. Poln.) Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych. 1971, z. 112.
- [5] Rysanow, W.A., A.N. Sadownikow, E.S. Juszcow, W.M. Bautin u. J.S. Niebogin: Die Auswirkung des Schlepperfahrwerks auf Boden und Pflanzenertrag. (Orig. Russ.) Mechanizacija i Elektrifikacija Socialisticeskogo Sel'skogo Chozajstwa. 1983. Nr. 5, S. 3/8.
- [6] Swiecicki, C., J. Siuta, J. Sienkiewicz, S. Trzecki u. J. Kiersnowski: Wichtige Bodeneigenschaften, die sich auf die Entwicklung der Mechanisierung auswirken. (Orig. Poln.) Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych. 1972.
- [7] Turski, R., H. Domzal u. A. Slowinska-Jurkiewicz: Untersuchungen über die Luft-Wasser-Eigenschaften in verdichteten Böden unter Schlepper- und Geräterädern während des Ackerbaus. (Orig. Poln.) Roczniki Nauk Rolniczych. Seria A. 1974. B. 100. z. 3.
- [8] Sommer, C., H. Steinkampf, M. Zach u. W. Czeratzki: Ein Beitrag zum Problem der Bodenverdichtung beim Einsatz leistungsstarker Schlepper. Landbauforschung Völknerode Bd. 25 (1975) H. 2, S. 69/74.
- [9] Przesmycki, J.: Die Untersuchung der Auswirkung von Radschlupf auf die Bodenverdichtungsverteilung. (Orig. Poln.) Diss. Landw. Akademie Lublin, 1980.
- [10] Davies, D.B., J.B. Finney u. S.J. Richardson: Relative effects of tractor weight and wheel slip in causing soil compaction. Journal of Soil Science Bd. 24 (1973) Nr. 3, S. 399/409.
- [11] Raghavan, G.S.V., E. McKyes u. B. Beaulieu: Clay soil compaction due to wheel slip. Trans. ASAE Bd. 21 (1978) Nr. 4, S. 646/49 u. 653.
- [12] Raghavan, G.S.V., E. McKyes u. M. Chasse: Effect of wheel slip on soil compaction. J. Agric. Engng. Res. Bd. 22 (1977) Nr. 1, S. 79/83.
- [13] Woyke, W.: Einfluß des Schlupfes der Schleppertreibräder auf Struktur und physische Eigenschaften des leichten Bodens. (Orig. Poln.) Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. 1982. Nr. 138, S. 149/61.
- [14] Karczewski, T.: Einfluß der Radgeschwindigkeiten von Landmaschinen auf die Änderungen der Bodendichte. (Orig. Poln.) Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych, 1978, Nr. 201, S. 69/74.
- [15] Kozicz, J. u. Z. Blaszkiewicz: Einfluß der Schlepperräder bei Bewegung mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf die physischen Bodeneigenschaften in den Radsuren. (Orig. Poln.) Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 1975, L. XXXII.
- [16] Vomocil, J.A., E.R. Fountaine u. R.J. Reginato: The influence of speed and drawbar load on the compacting effects of wheeled tractors. Soil Science Soc. Am. Proc. Bd. 22 (1958) Nr. 2, S. 178/80.
- [17] Blaszkiewicz, Z.: Eine Methode zur Messung des Treibradschlupfes bei Untersuchungen zur Bodenverdichtung. (Orig. Poln.) Roczniki Nauk Rolniczych, Seria C, im Druck.
- [18] Blaszkiewicz, Z.: Untersuchungen über den Schlupf von Schleppertreibrädern auf dem Acker. (Orig. Poln.) Maszyny i Ciagniki Rolnicze, 1984. Nr. 2.
- [19] Trzecki, S. u. H. Krol: Die Bestimmungsmethoden für verschiedene Luft-Wasser-Eigenschaften und die Porengrößenverteilung. (Orig. Poln.) Warszawa: PTG 1971.
- [20] Malec, E. u. S. Mejza: Untersuchungen des Effekts der nichtlinearen Regression. Roczniki Nauk Rolniczych Akademii Rolniczej w Poznaniu. 1975, z. IV.
- [21] Droese, H., A. Radecki u. L. Smierzchalski: Reaktion des Kulturpflanzenwachstums auf die Bodenverdichtung Teil II. Winterroggen. (Orig. Poln.) Roczniki Nauk Rolniczych, Serie A Bd. 105 (1982) Nr. 3, S. 43/55.