

Analyse des Schervorganges in leichtem Boden

Von Zbigniew Blaszkiewicz, Posen, Polen*)

DK 631.43:539.415

Scherbeanspruchungen des Bodens spielen bei der Bodenbearbeitung wie auch für die Zugkraftübertragung der Schlepper eine wichtige Rolle. Die Kenntnis über die einzelnen Vorgänge beim Ablauf der Scherprozesse mit großen Scherwegen auf landwirtschaftlichen Böden ist aber bisher unzureichend.

In diesem Beitrag wird für einen Sandboden mit geringem Tonanteil versucht, die Einzelvorgänge auf den Scherflächen genauer zu klären, indem bei verschiedenen Normalspannungen die Spannungs-Verformungs-Beziehungen ermittelt werden und parallel dazu die auf der Scherfläche vorhandene Masse an lockerem Boden und dessen Korngrößenverteilung bestimmt werden.

1. Einleitung

Im Grundbau ist der Schervorgang von Sand im Hinblick auf die hier zu ermittelnden Kenngrößen, maximale erreichbare Scherspannung und Proportionalgrenze, ein geklärtes Problem. Die Kenntnisse über die Schervorgänge in sandigen Böden unter den in der Landwirtschaft relevanten Bedingungen sind dagegen weiterhin unvollständig.

Die Behandlung der landwirtschaftlichen Bodenschervorgänge lehnt sich bisher grundsätzlich an die allgemeine aus dem Grundbau bekannte Interpretation des Problems an [1], indem die dortigen Erkenntnisse auf das Gebiet der Landmaschinenkonstruktion [2] und die theoretische und empirische Behandlung des Systems Fahrwerk/Boden [3] übertragen werden.

In Anbetracht der grundsätzlichen Unterschiede kann die Zurückführung landwirtschaftlicher Bodenschervorgänge auf die für den Grundbau gewonnenen Meßergebnisse und Interpretationen nur ein annäherndes Bild der auftretenden Erscheinungen vermitteln. Es ist aus diesem Grund berechtigt, weitere Forschungen zur Messung und Interpretation der Wechselbeziehungen zwischen Spannungen und Formänderungen durchzuführen, insbesondere für leichte Böden, die in unserem Lande überwiegen. Diese Forschungen können dann Grundlage sein sowohl für die analytische Bestimmung der Traktionseigenschaften von Fahrwerken wie auch für den Entwurf von Arbeitsorganen für Bodenwerkzeuge und besonders von Werkzeugen für die landwirtschaftliche Bodenbearbeitung.

Die Klärung der Vorgänge, die beim Scheren von leichtem Boden ablaufen, gewinnt auch an Bedeutung aus der Sicht der Erosion der oberen Bodenschicht durch Oberflächenwasser und Wind, die in den letzten Jahren ständig an Stärke zugenommen hat. Es wird nämlich vermutet, daß die Ursache dieses für die Landwirtschaft ungünstigen Vorgangs unter anderem in der Zerstörung von Bodenteilchen und Bodenaggregaten zu suchen ist, die während des Schervorganges auftritt [4, 5].

Aus all diesen Gründen wird in dieser Arbeit versucht, eine Analyse des Scherproblems durchzuführen, wobei zusammen mit der Ermittlung von Spannungs-Verschiebungs-Kennlinien die Masse und Korngrößenverteilung des lockeren Bodens auf der Scherfläche untersucht wird. Für die Versuche wird aus praktischen Gründen – wie auch sonst häufig – das dreiaxiale System der Boden Spannungen und Bodenverschiebungen, das bei der Bodenschernung durch Arbeitsorgane und Fahrwerke auftritt, auf ein ebenes System zurückgeführt, so daß die Versuche mit gewissen Versuchsvereinfachungen in einem direkten Scherapparat durchzuführen sind.

2. Ziel und Methodik der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen ist – wie zuvor angedeutet – die Klärung des Scherprozesses von leichtem Boden durch Bestimmen der genauen Spannungs-Verschiebungs-Charakteristik des Bodens in Verbindung mit der Ermittlung der jeweiligen Masse und Korngrößenverteilung des lockeren Bodens auf der Scherfläche. Aufgrund der Meßergebnisse wird versucht, die Masse des gelockerten und der Deformation unterliegenden Bodens in der Scherfläche durch eine Modellgleichung zu beschreiben.

Die Messungen wurden mit einem Scherapparat Typ AB 64 aus den Versuchswerkstätten der Jagiellonski-Universität Krakau entsprechend der hierfür verbindlichen Methode durchgeführt. Der Boden für die Scherversuche war ein leicht toniger Sand, dessen Korngrößenverteilung mit der Aräometer-Methode von *Bouyoucos* in der Modifikation nach *Broszynski* bestimmt wurde. Der Scherapparat wurde mit einem Boden gefüllt, der nur mit Inkaufnahme einer Strukturveränderung dem Acker entnommen werden konnte. Die in *Tafel 1* zusammengestellten wichtigsten Bodeneigenschaften wurden wie folgt bestimmt:

- Dichte der festen Bodenphase mit dem Pyknometer
- Raumdichte des Bodens mit einem 100 cm³-Stechzylinder und der Trocken-Wäge-Methode
- Bodenfeuchte mit der Trocken-Wäge-Methode
- Gehalt an organischer Substanz durch Bestimmung des organischen Kohlenstoffs mit der Methode von *Iszczerykow*.

Der Bereich für den Scherweg war vorgegeben durch den maximalen Wert von 10 mm, der mit diesem Scherapparat zu erreichen ist. Als Normalspannungen bei der Scherung wurden Werte angesetzt, wie sie auf dem Streichblech von Pflügen [2] oder unter Rädern [3] auftreten. Die Versuche wurden mit den drei Normalspannungen $\sigma_1 = 49,05 \text{ kN m}^{-2}$, $\sigma_2 = 98,10 \text{ kN m}^{-2}$ und $\sigma_3 = 147,15 \text{ kN m}^{-2}$ durchgeführt.

Die eingehende Analyse des Scherprozesses erforderte eine genaue Aufzeichnung der Kurven, die die Abhängigkeit der Scherspannung vom horizontalen Verschiebungsweg j darstellen. Dazu wurden Messungen der Scherspannungen für Schritte der horizontalen Verschiebung von je 0,25 mm durchgeführt. Die Masse und Korngrößenverteilung des lockeren Bodens auf den Scherflächen wurde für horizontale Verschiebungen von $j_1 = 2,4$, $j_2 = 4,8$, $j_3 = 7,2$ und $j_4 = 9,6$ mm bestimmt. Zur Charakterisierung des Ausgangszustands bei der Zerstörung von Bodenteilchen und Bodenaggregaten auf den Scherflächen und im Bodenkörper wird auch die Korngrößenverteilung des Bodens bestimmt, der noch nicht der Scherung unterliegt ($j = 0$), wohl aber der jeweiligen Normalspannung σ_n ausgesetzt war.

*) Dr.-Ing. Z. Blaszkiewicz arbeitet am Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft der Landwirtschaftlichen Akademie Posen.

Korngrößenverteilung *)		
Bodenskelett	> 1 mm	4,7 %
Feinboden		
Grobsand	1,0–0,1 mm	66,0 %
Feinsand	0,1–0,02 mm	21,0 %
Abschlämmb. Bestandteile	< 0,02 mm	13,0 %
Dichte der festen Bodenphase		$2,62 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Lagerungsdichte		$1,34 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Bodenfeuchte		5,4 %
Gehalt an organ. Substanz		1,34 %

* Die hier verwendeten Größenfraktionen entsprechen nicht den in der Bundesrepublik üblichen Fraktionen

Tafel 1. Eigenschaften des im Scherversuch eingesetzten Bodens.

Der lockere Boden auf den Scherflächen wird nach Öffnung des zweiteiligen Scherapparates entnommen durch Abblasen der beiderseitigen Gleitflächen mit einem schwachen Luftstrom festgelegter Geschwindigkeit. Die aus 5 Versuchswiederholungen für jede Kombination von Normalspannung σ_n und Scherweg j_n ermittelte Masse lockeren Bodens wird auf die Scherfläche bezogen und als flächenbezogene Masse in kg m^{-2} angegeben. Die Korngrößenverteilung wird als prozentualer Massenanteil von Bodenteilen der Fraktionen > 10, 10–7, 7–5, 5–3, 3–2, 2–1, 1–0,5, 0,5–0,25 und < 0,25 mm durch Sieben mit einem Siebsatz ermittelt.

3. Versuchsergebnisse und Auswertung

Die in den Versuchen ermittelten Abhängigkeiten zwischen der Scherspannung im Boden und der horizontalen Verschiebung wurden als Funktion $\tau = f(j)$ mit der Normalspannung σ_n als Parameter aufgetragen, Bild 1.

Für die Beziehung zwischen der Masse des lockeren Bodens, der horizontalen Verschiebung und der herrschenden Normalspannung wurde mit Hilfe der Mehrfachregression mit Auswahl der besten Teilmenge der unabhängigen Variablen [6] eine mathematische Gleichung abgeleitet. Die dafür notwendigen Berechnungen wurden auf einem Digitalrechner ODRA 1204 durchgeführt. Die statistische Analyse ($\alpha = 0,05$) hat gezeigt, daß die Masse an lockeren Bodenaggregaten auf den Scherflächen von den beiden untersuchten Variablen, d.h. sowohl von der bei der Scherung einwirkenden Normalspannung σ_n als auch von der Größe der horizontalen Verschiebung j , abhängig ist.

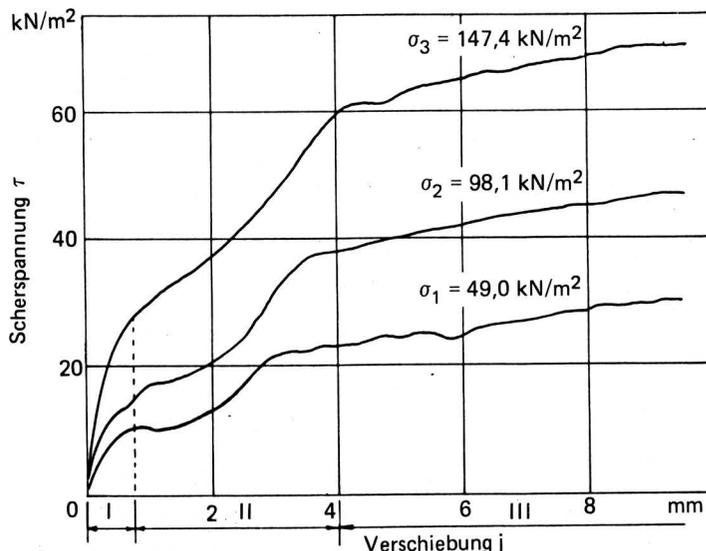


Bild 1. Scherspannungen eines tonigen Sandes in Abhängigkeit vom Scherweg für verschiedene Normalspannungen.

Die Ergebnisse werden durch folgende Form der Mehrfachregressionsgleichung ($R^2 = 82,42$) beschrieben:

$$G = 1,6210 - 0,0593 j - 0,0050 \sigma_n \quad (1),$$

darin ist

- G flächenbezogene Masse des lockeren Bodens auf den Scherflächen in kg m^{-2}
- j horizontale Verschiebung des Bodens (Scherweg) in mm
- σ_n auf den der Scherung unterliegenden Boden wirkende Normalspannung in kN m^{-2} .

Eine genaue Analyse der Versuchsergebnisse wird erleichtert durch die graphische Darstellung der Abhängigkeit $G = f(j)$ für die verschiedenen Normalspannungen σ_n mit Hilfe von Näherungskurven, Bild 2.

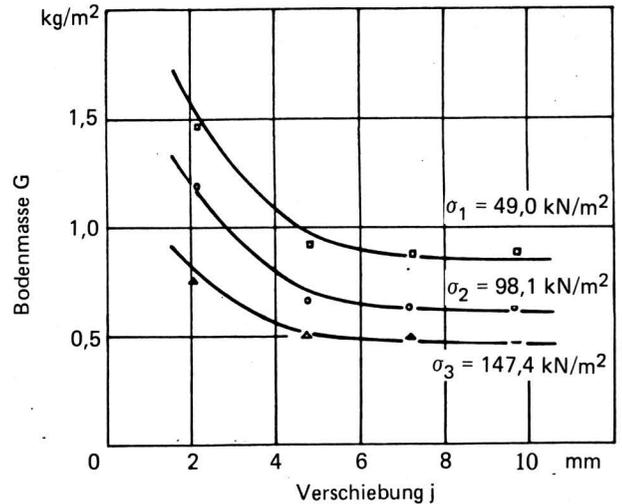


Bild 2. Flächenbezogene Masse von lockerem Boden auf der Scherfläche in Abhängigkeit vom Scherweg für verschiedene Normalspannungen.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse für die Korngrößenverteilung des lockeren Bodens auf den Scherflächen bei den verschiedenen untersuchten Normalspannungen σ_1 bis σ_3 und Verschiebungen $j = 0$ bzw. j_1 bis j_4 zeigt Bild 3 in Form von Histogrammen.

4. Analyse der Versuchsergebnisse

Die Analyse der in Bild 1 dargestellten Funktionen $\tau = f(j)$ macht den unterschiedlichen Ablauf des Scherprozesses in verschiedenen Bereichen der horizontalen Verschiebung deutlich. Im Kurvenverlauf sind mindestens drei Stadien des Scherprozesses zu unterscheiden. Diese Stadien ergeben sich aus unterschiedlichen Abläufen bei der Überwindung der Scherwiderstände, deren Ursachen im Schrifttum allgemein durch Reibungs- und Kohäsionskoeffizienten beschrieben werden. Diese Größen sind als Koeffizienten anzusehen, die die Ergebnisse von vielen Scherprozessen bei leichten Böden wiedergeben, den Ablauf der Scherung selbst aber, wie bei der weiteren Analyse gezeigt wird, nicht widerspiegeln. Aus diesem Grund werden diese Koeffizienten in dieser Arbeit nicht untersucht.

Es wird vielmehr versucht, ausgehend von den eigenen Forschungsarbeiten eine Analyse der Vorgänge bei der Überwindung der Scherwiderstände durchzuführen. Diese Analyse bereichert das Wissen über diese Probleme und gestattet auch, die verschiedenen Stadien bei der Überwindung der Scherwiderstände zu unterscheiden, die nicht nur aus dem charakteristischen Verlauf der Kurven $\tau = f(j)$ hervorgehen, sondern auch aus Unterschieden in

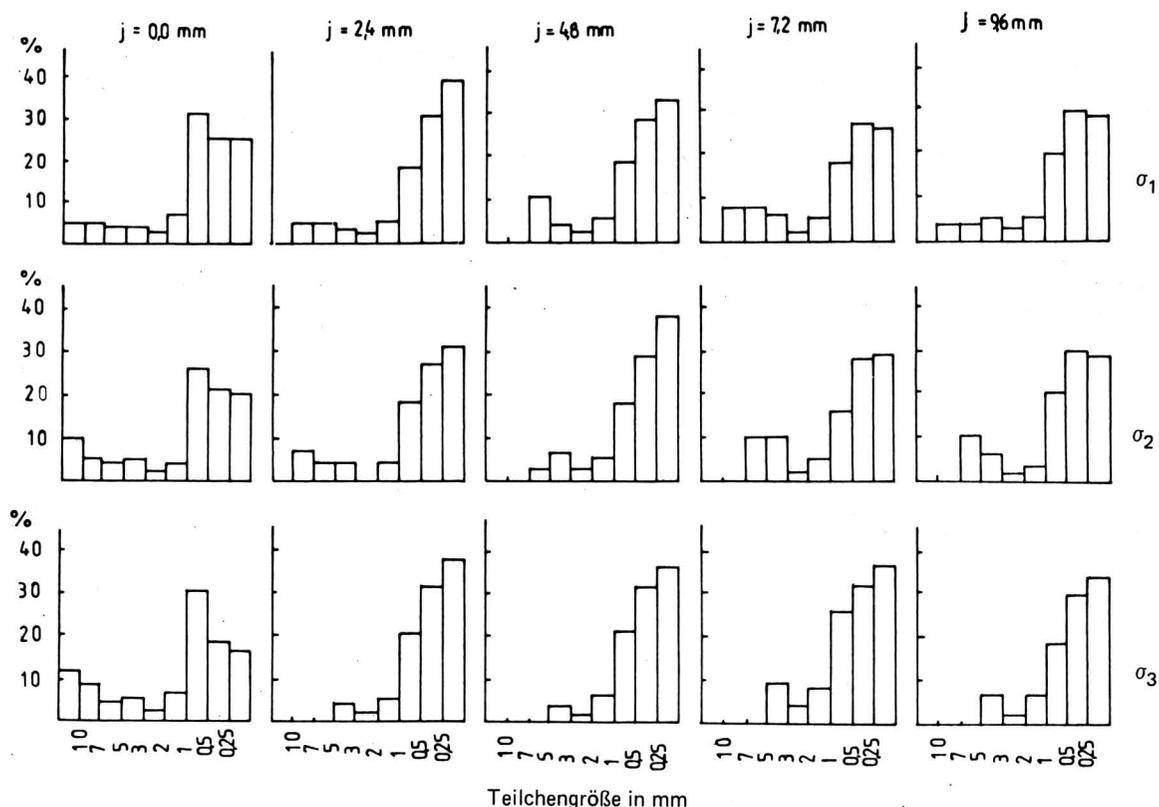


Bild 3. Korngrößenverteilung (Massenanteil in %) des lockeren Bodens auf der Scherfläche für verschiedene Scherwege und die Normalspannung $\sigma_1 = 49,0 \text{ kN m}^{-2}$, $\sigma_2 = 98,1 \text{ kN m}^{-2}$, $\sigma_3 = 147,4 \text{ kN m}^{-2}$.

der Masse lockerer Bodenaggregate auf den Scherflächen (Bild 2) und Unterschieden in der Korngrößenverteilung des lockeren Bodens (Bild 3) abzulesen sind.

Das Stadium I (Bild 1) ist bei den verschiedenen untersuchten Normalspannungen bestimmt durch einen Abschnitt der Kurven $\tau = f(j)$ mit deutlichem Anstieg der Scherspannungen. Allein aufgrund der eigenen Untersuchungen kann wegen methodischer Schwierigkeiten bei der Beobachtung des dichten Bodens über dieses Stadium nicht viel gesagt werden. Allgemein wird angenommen, daß der starke Anstieg der Scherspannungen in der Anfangsphase der Verschiebung im Anwachsen der Anpressung und der Berührungsfläche von benachbarten, verzahnten Bodenteilchen und im Anwachsen der Bodenkräfte aufgrund chemischer Bindungen begründet ist.

In diesem Stadium ist die Fläche, in der die Scherung abläuft, schwer zu lokalisieren. Es wird angenommen, daß Scherung in einem System von Bodenelementen mit kleinster Festigkeit auftritt. Wie die eigenen Untersuchungen zeigen, kommt Scherung in vielen Teilflächen vor, die anfangs nur lokal auftreten und sich erst in der Schlußphase von Stadium I miteinander vereinigen und die Hauptscherfläche bilden. Die Hauptscherfläche bildet sich bei einer Verschiebung von 0,5–1,0 mm aus, die daraus folgende Verminderung der Bodenschersfestigkeit ist im Diagramm durch die stärkere Krümmung der Kurven $\tau = f(j)$ gekennzeichnet. Dieser Vorgang bestimmt deutlich die Grenze von Stadium I und stellt die wahre Bruchgrenze dieses Bodens dar, deren Festlegung für andere leichte Böden bisher häufig Schwierigkeiten bereitete.

Das Stadium II umfaßt die progressiven Abschnitte der Kurven $\tau = f(j)$. Die in Bild 2 und 3 dargestellten Untersuchungsergebnisse lassen darauf schließen, daß die Ursache für die Änderungen der Scherspannungen in den Änderungen zu sehen ist, die auf den Scherflächen und im lockeren Boden zwischen den Scherflächen auftreten. Das Entstehen zahlreicher lokaler Gleitflächen in der Schlußphase von Stadium I führt zum Losreißen von Bodenteil-

chen verschiedener Größen, überwiegend aber flacher Form, wie zu beobachten war, und zur Bildung von Unebenheiten der Scherflächen. Es ist daraus zu schließen, daß infolge der Unebenheiten die Bodenteilchen der Scherflächen sich nur teilweise direkt miteinander verzahnen und hauptsächlich lockere Bodenaggregate diese Verzahnung vermitteln. Die Verminderung der Anzahl von Verzahnungen kann sogar einen Abfall der Scherspannungen bewirken, wie es im Anfangsbereich der Verschiebung im Stadium II teilweise zu beobachten ist.

Mit fortschreitender Verschiebung werden diese Verzahnungen überwunden, was vermutlich mit einem Lösen der Bodenaggregate aus dem Bodenkörper und ihrer Zerkleinerung verbunden ist. Das führt zum Ausgleich der Reibflächen und zu einer größeren Anzahl von Verzahnungen, was im Endergebnis wieder ein Ansteigen der Spannungen bewirkt. Während dieses Prozesses tritt eine intensive Bindung von lockerem Bodenteilchen durch den Bodenkörper auf, wie die Verminderung der Masse an lockerem Boden auf der Scherfläche im Bereich $j < 5 \text{ mm}$ in Bild 2 aufzeigt.

Im Stadium II verändert sich die Korngrößenverteilung auf der Scherfläche unter der Wirkung der Scherkräfte nur wenig, sie unterscheidet sich aber wesentlich von der Korngrößenverteilung des Bodens, der ohne Scherung ($j = 0$) nur den Normalspannungen ausgesetzt ist. Im lockeren Boden auf den Scherflächen (Bild 3) tritt nämlich eine größere Masse von Bodenteilchen auf, die kleiner als 0,5 mm sind, während die großen Bodenteilchen mit geringerer Masse vertreten sind oder sogar ganz fehlen, wodurch auf die destruktive Wirkung der Scherkräfte hingewiesen wird.

Das Stadium II des Scherprozesses ist durch eine starke Abnahme der Masse an lockerem Boden mit zunehmendem Scherweg (Bild 2) gekennzeichnet. Die deutliche Begrenzung dieser Abnahme, die auf eine geringere Intensität der zuvor dargestellten Prozesse auf den Scherflächen hinweist, bestimmt das Ende von Stadium II bei einer horizontalen Verschiebung von ca. 4 mm.

Das Stadium III der Scherung ist dann ein Scherprozeß, der bei nahezu gleichbleibender Masse von lockerem Boden auf den Scherflächen durch einen kleinen Anstieg der Scherspannungen und geringe Änderungen auf den Scherflächen charakterisiert ist. Es scheint, daß auf ähnlicher Grundlage auch ein Stadium IV der Scherung definiert werden könnte, Bild 4, in dem ein Anstieg der Spannung τ nicht mehr auftritt, das aber infolge des begrenzten Verschiebungsbereiches der benutzten Schervorrichtung nicht bestimmt wurde.

Wie aus Bild 1 bis 3 ersichtlich ist, löst die Scherung leichten Bodens bei unterschiedlicher Normalspannung einander ähnliche Vorgänge aus. Allerdings treten bei Wirksamwerden größerer Normalspannungen auch größere Scherspannungen τ , aber kleinere Massen an lockerem Boden auf den Scherflächen auf, verbunden mit einer kleineren Masse oder dem Fehlen von Bodenteilchen, die größer als 5–7 mm sind. Das ist dadurch zu erklären, daß sich bei größeren Normalspannungen die Scherspannungen näher an der theoretischen ebenen Scherfläche konzentrieren, was nach der Scherung glattere Scherflächen ergibt, wie zu beobachten ist, auf denen größere Bodenteilchen fehlen (s. auch Bild 3). Die hierbei auftretenden zahlreichen Verzahnungen kleiner Bodenteilchen mit im allgemeinen größerer mechanischer Festigkeit verursachen den Anstieg des Scherwiderstandes, der durch größere Spannungen τ charakterisiert ist.

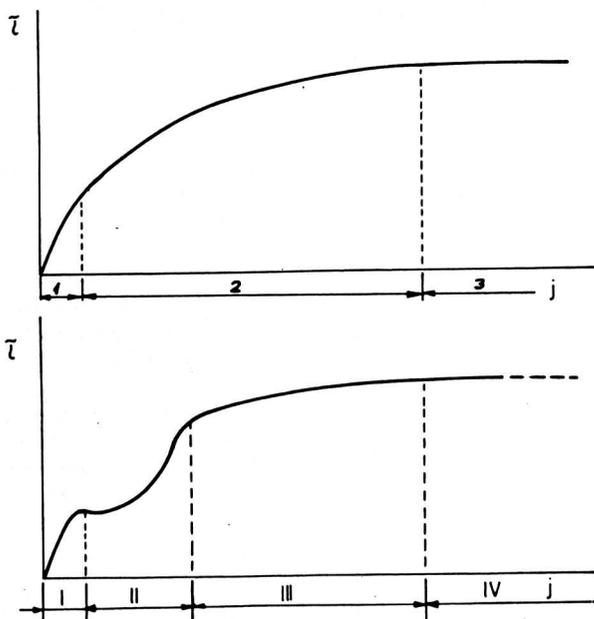


Bild 4. Scherspannung als Funktion des Scherwegs; oben: zumeist vorgestellte Kurvenform mit der Einteilung in drei Zustandsbereiche nach *Wiendieck* [10]:

1 elastischer Zustand, 2 Übergangszustand, 3 plastischer Zustand; unten: Kurven nach den eigenen Messungen mit den behandelten Stadien I–IV, Stadium IV gestrichelt gezeichnet, da es in der vorhandenen Schervorrichtung nicht gemessen werden konnte.

5. Diskussion der Versuchsergebnisse

Die endgültige Klärung der mit der Bodenschерung verbundenen Probleme ist sehr schwer angesichts des verwickelten Charakters der auftretenden Erscheinungen bei der Überwindung von Widerständen, die sich in den einzelnen Phasen der Scherung aufbauen, und angesichts der immer noch nicht überwundenen methodischen Schwierigkeiten. Im Schrifttum wird am häufigsten eine allgemeine Formulierung angegeben, die sagt, daß der Kennlinienverlauf $\tau = f(j)$ ein Ergebnis der Überwindung von Reibungswiderständen ist. Außerdem wird im Prinzip bei der Interpretation der Unter-

schiede der Bodenschерung in verschiedenen Stadien die unterschiedliche horizontale Verschiebung des Bodens nicht hinreichend berücksichtigt, obwohl in den am häufigsten mit Bewehrern durchgeführten Versuchen die eingehenden Kurvenverläufe mit verschiedenen Formen der Funktion $\tau = f(j)$ registriert und in Veröffentlichungen dargestellt wurden [2, 3, 7, 8, 9].

Nur wenige diese Problematik behandelnde Arbeiten enthalten eingehendere Interpretationen [10], die in gewissem Bereich durch die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen erweitert und ergänzt werden können. Die von *Wiendieck* dargestellte Theorie betrifft den am häufigsten auftretenden Verlauf der Kurve $\tau = f(j)$, Bild 4 oben, nämlich den parabelähnlichen Verlauf. Dieser Autor unterscheidet drei Zustände bei der Bodenschерung:

1. den elastischen Zustand (elastic state),
2. den Übergangszustand (intermediate state) und
3. den plastischen Zustand (plastic state).

Der elastische Zustand, dessen obere Grenze der Autor nicht bestimmte, entspricht dem Stadium I der Scherung bei den eigenen Untersuchungen, die eine Kurve $\tau = f(j)$ mit etwas anderem Verlauf ergaben, Bild 4 unten. Dieser Zustand wurde bei unserer Arbeit nicht eingehend untersucht, und deshalb werden die Betrachtungen hierzu auf die Feststellung begrenzt, daß für bestimmte Bedingungen des untersuchten, leichten Bodens die Bestimmung der oberen Grenze von Stadium I möglich ist, wie es zuvor bei der Ergebnisanalyse dargestellt wurde.

Wegen der Zerstörung der Probe in diesem Punkt sollte diese Grenze als Bruchgrenze für diesen Boden betrachtet werden, wie es auch allgemein geschieht. Dagegen treten die maximalen Scherspannungen in einem ganz anderen Bereich der horizontalen Verschiebung auf. Da die Grenze von Stadium I bestimmt werden kann, sollte man der Unterscheidung und Ausnutzung dieser Größen mehr Aufmerksamkeit schenken.

Wiendieck gibt an [10], daß der Übergangszustand ein Zustand mit einer Zunahme von zahlreichen, lokalen Gleitungen zwischen Bodenteilchen ist, die zur Entstehung der allgemeinen Gleitfläche bei der Bodenschерung führen. Er gibt auch an, daß sich die Bodenstruktur in dem Formänderungsprozeß bei Zunahme der Scherspannungen ständig ändert bis zur Festlegung der Bodenteilchenstruktur, die den plastischen Zustand des Scherprozesses ergibt. Diese allgemeine Interpretation scheint bei Berücksichtigung der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen richtig, aber unvollständig zu sein, auch für den Kurvenverlauf $\tau = f(j)$ wie in Bild 4 oben. Sie gestattet nämlich nicht, im Übergangszustand zwei Stadien (Stadium II und III) anzugeben, die sich hinsichtlich der auf den Scherflächen auftretenden Prozesse unterscheiden, wie hier in der Ergebnisanalyse nachgewiesen wurde.

Im Stadium II, nach der Bildung von ungleichmäßigen Scherflächen und dem Lösen einer großen Menge von Bodenteilchen, was sogar einen zeitweiligen Abfall der Spannungen τ ergibt, beginnt der Prozeß des Flächenhomogenisierens (des Ausgleichs) durch Losreißen und Binden von Bodenelementen zu dominieren. Die dadurch entstehende größere Zahl von Verzahnungen führt in immer größerem Maß zum Scherspannungsanstieg.

Die deutlich erkennbaren Änderungen im Kurvenverlauf, Bild 2 und Bild 4 unten, die auf das Ende der Änderungen auf den Scherflächen hinweisen, bilden den Anfang von Stadium III, in dem man einen langsamen Anstieg der Spannungen τ beobachtet. Es folgt das Stadium IV, das in dieser Arbeit wegen des begrenzten Verschiebungsbereiches nicht bestimmt wurde, das im Diagramm, Bild 4 unten, deshalb mit einer unterbrochenen Linie gekennzeichnet wurde und für das man annimmt, daß es dem plastischen Zustand entspricht. Der plastische Zustand ist bestimmt durch konstante Spannungen τ und gleichbleibende Prozesse auf den Scherflächen, die im Bereich großer horizontaler Verschiebungen bei leichten Böden auftreten.

Aus dem Schrifttum kann man die Meinung gewinnen, daß man aus detaillierten Kennlinien $\tau = f(j)$ durch eine genaue Analyse auch für andere leichte Böden und bei anderen Bedingungen die in der Arbeit festgestellten und bestimmten Stadien des Scherprozesses

ses lokalisieren könnte. Für diese Analysen ist die Frage sehr wichtig, ob die Bestimmung der verschiedenen Scherungsstadien von leichtem Boden Erfolg verspricht, besonders in der Anwendung auf allgemein angenommene Theorien der Radbewegung und dabei auch in der Anwendung auf das Zusammendrücken des Bodens durch die Räder.

Die Antwort auf diese Frage ist nicht leicht, weil entsprechende genügend fundierte Forschungen fehlen. Aus den wenigen Forschungen ist aber eine Abschätzung möglich, die eine positive Einstellung zur weiteren Behandlung der Scherung von leichtem Boden auf der Basis der Stadien Theorie begründet. Bei analytischen Berechnungen der Radbewegungskräfte wird der Verlauf der Funktion $\tau = f(j)$ besonders im Stadium II und III nicht berücksichtigt. Dieser kann aber, wie das in dieser Arbeit nachgewiesen wurde, für verschiedene Bodenbedingungen unterschiedlich sein. Solche Traktionsparameter wie Kohäsion, Winkel der inneren Reibung oder Koeffizient K werden aus der maximalen Scherspannung oder aus der anfänglichen Neigung der Kurve im j, τ -Diagramm ermittelt, diese Koeffizienten berücksichtigen also nicht den Charakter von Stadium II und III.

Ausgehend von der Bekkerschen Beziehung [3]:

$$j = x s,$$

mit

- s Radschlupf und
- x Entfernung des betrachteten Punktes vom Berührungspunkt, gemessen entlang der Berührungsfläche zwischen Radreifen und Boden,

hat man nachgewiesen, daß das Stadium IV der Scherung unter dem Rad auftritt [10], wenn der Schlupf größer als 30 % ist, ein Schlupfwert, der in der Praxis sehr selten erreicht wird.

Wenn man annimmt, daß die in der vorliegenden Arbeit bestimmte Abhängigkeit zwischen der Verschiebung und der Masse an lockerem Boden auf der Scherfläche $G = f(j)$ (Bild 2) und die von *Blaszkiewicz* u.a. [11] bestimmte Abhängigkeit zwischen dem Radschlupf s und der Masse des lockeren Bodens auf der Scherfläche unter der Radlauffläche $G = f(s)$, Bild 5, einander ähnlich sind, ist das Auftreten der oberen Grenze von Stadium II der Scherung unter dem Rad für Werte des Schlupfes von etwa 15–17 % und sogar bis 30 % anzusetzen.

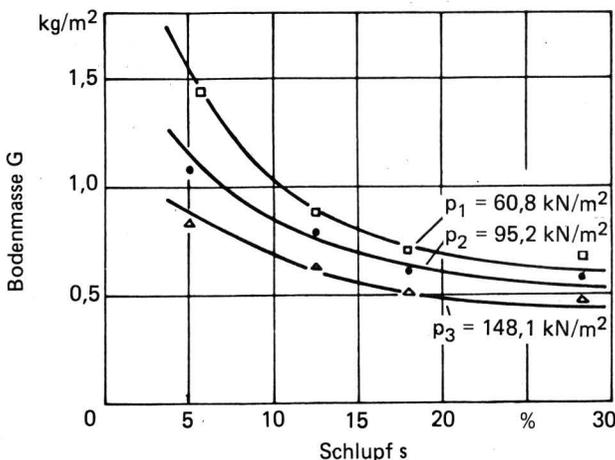


Bild 5. Flächenbezogene Masse von lockerem Boden auf der Scherfläche zwischen Radlauffläche und Boden in Abhängigkeit vom Radschlupf für verschiedene Bodendrücke; nach *Blaszkiewicz* [11].

Hieraus geht also hervor, daß unter den Antriebsrädern landwirtschaftlicher Fahrzeuge, die sich meistens mit Schlupfwerten bis 15 % bewegen, ein Spannungs- und Verformungszustand und damit auch eine Struktur des lockeren Bodens in der Scherzone zu erwarten ist, die dem Stadium II entspricht. Angesichts dessen ist aber auch zu erwarten, daß der bei verschiedenen Bedingungen des Bodenuntergrundes unterschiedliche Verlauf der Abhängigkeit $\tau = f(j)$ in diesem Stadium die Traktionsparameter der Räder bestimmen wird. Die oben angesprochenen Probleme sind also beachtenswert und fordern die Durchführung entsprechender Untersuchungen, die zur Präzisierung von Theorie und Empirie der Radbewegung beitragen können.

Die eingehende Analyse der Untersuchungsergebnisse läßt auch vermuten, daß der unterschiedliche Charakter des Scherprozesses in verschiedenen Bereichen der horizontalen Verschiebung sich in unterschiedlicher Formänderung des Bodens unter den Antriebsrädern und damit unterschiedlichen Eigenschaften des Untergrundes auswirkt. Eine Klärung dieser Probleme durch entsprechende Untersuchungen kann demnach auch zur Bereicherung des Wissens über den unterschiedlichen Einfluß der Schlepperantriebsräder bei verschiedenem Schlupf und bei verschiedenem Bodendruck auf die Kohäsion und die Wasser- und Luftgehalte des Bodens [12] beitragen.

6. Landtechnische Bedeutung des Zusammenhanges

$$G = f(\sigma_n, j)$$

Das Auftreten von lockeren Bodenteilchen bei der Scherung weist auf die landwirtschaftliche Bedeutung der analysierten Probleme hin. Während der Bodenschärung entsteht nämlich eine vermehrte Zahl von mit dem Bodenkörper nicht verbundenen, aerodynamisch aktivierbaren Bodenaggregaten mit einem Durchmesser kleiner als 1 mm, die sogar bis 80 % der gesamten lockeren Masse bilden können. Nimmt man an, daß von einer gesamten Ackerfläche von 1 ha 50 % der Fläche im Jahr mit Spuren von breiten Antriebsreifen bedeckt werden [5], dann kann sich die Masse der Bodenteilchen, die von der Winderosion und vermutlich auch von der Wassererosion [5, 13] aktiviert werden können, im Bereich von 2–6 t bewegen. Eine Begrenzung der möglichen, ungünstigen physikalischen Auswirkungen ist, wie das durchgeführte Forschungen bestätigten, in sehr großem Maße mit der Steuerung von solchen Parametern wie horizontale Verschiebung des Bodens, Scherspannungen oder Normalspannungen gegeben.

Angesichts der großen Bedeutung für die Landwirtschaft sollten die angesprochenen Zusammenhänge $G = f(\sigma, j)$ von den Forschern stärker berücksichtigt werden, die sich mit den Problemen von Rad/Boden- oder Werkzeug/Boden-Systemen beschäftigen. Während die Möglichkeit zum Übertragen der hier gewonnenen Abhängigkeiten auf die Scherprozesse der leichten Böden durch Bodenbearbeitungswerkzeuge durch entsprechende Forschungen bisher nicht bestätigt ist, ist eine Übertragung auf das System Rad/Boden mit gewisser Annäherung möglich. Sie ist möglich aufgrund der zuvor angesprochenen Ähnlichkeit zwischen der Funktion $G = f(\sigma, j)$ (Bild 2) und der Funktion $G = f(s)$ (Bild 5), die die Abhängigkeit zwischen der Masse der lockeren Bodenteilchen auf den Scherflächen unter dem Antriebsrad und dem Schlupf s und dem Bodendruck p darstellt.

Es ist anzunehmen, daß es nach Durchführung entsprechender Untersuchungen und Analysen möglich wird, mit einfachen Bodenuntersuchungen wie z.B. im Scherapparat, Aussagen über Änderungen der Bodenstruktur bei verschiedenen Bodenbedingungen unter den Antriebsfahrwerken oder bei der Bodenschärung mit landwirtschaftlichen Werkzeugen zu gewinnen. Das wird beitragen zu einer unter dem Gesichtspunkt der ungünstigen Auswirkung auf den Boden besser kontrollierten Verwendung der mechanischen Geräte im Ackerbau.

7. Zusammenfassung

In der Arbeit werden Scherversuche von leichtem Boden mit einer Feuchtigkeit von 5,4 % (toniger Sand) im Scherapparat dargestellt zusammen mit Messungen der Korngrößenverteilung des lockeren Bodens auf den Scherflächen.

Die Analyse der Ergebnisse weist darauf hin, daß ein Zusammenhang besteht zwischen der Scherbeanspruchung und dem Anteil von Bodenteilchen kleiner als 1 mm an der Masse des lockeren Bodens auf den Scherflächen.

Für bestimmte Untersuchungsbedingungen kann man im Kurvenverlauf der Funktion $\tau = f(j)$ für den Scherprozeß eines leichten Bodens vier Stadien unterscheiden, die — für verschiedene Normalspannungen ähnlich — sich durch unterschiedliche Verzahnungsprozesse zwischen den Bodenteilchen an den Scherflächen unterscheiden. Nach dem bisherigen Wissen sollten diese Unterschiede in den einzelnen Stadien des Scherprozesses bei verschiedenen Bodenbedingungen (besonders Stadium II und III) für eine präzisere theoretische Berechnung von Rad/Boden- oder Werkzeug/Boden-Systemen berücksichtigt werden.

Bei der Scherung leichten Bodens werden auf den Scherflächen Bodenteilchen losgelöst, deren Masse sich mit Anwachsen der horizontalen Verschiebungen und der Normalspannungen vermindert. Die Gefahr der Zunahme von Erosionsprozessen infolge eines vergrößerten Gehaltes von Bodenteilchen kleiner als 1 mm im Boden auf der Scherfläche könnte demnach eingeschränkt werden durch eine Auswahl von solchen Werten der Scherungsparameter, die eine geringe Bodenzerkleinerung bedingen.

Die in der Diskussion angesprochene Analogie der Untersuchungsergebnisse für die Bodendestruktion im Scherapparat einerseits und unter dem Antriebsrad andererseits fordert die Durchführung weiterer Untersuchungen, Untersuchungen über Scherprozesse bei anderen Bodenbedingungen wie auch Untersuchungen über Ähnlichkeiten der angesprochenen unterschiedlichen Scherprozesse und ihre Auswirkungen.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • *Lambe, T.W. u. R.V. Whitman*: Soil Mechanics. New York—London—Sydney—Toronto: John Wiley and Sons 1969.
- [2] • *Bernacki, H., J. Haman u. Cz. Kanafojski*: Theorie und Konstruktion der Landmaschinen. Warschau: Polskie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1967.
- [3] *Soltyński, A.*: Mechanik des Systems Fahrzeug—Gelände. Wydawnictwo MON. Warschau: 1966.
- [4] *Dinov, D.S. u. K. Wasiliew*: Prüfung der Bodenflächenverdichtung durch Schlepperlaufwerke. Selskostopanska Technika, Bd. XII (1975) Nr. 6.
- [5] *Kozicz, J., Z. Blaszkiewicz, S. Podsiadlowski u. L. Piechnik*: Einfluß des Laufwerks von Schleppern und Landmaschinen auf die Wasser- und Winderosion leichten Bodens. Bericht und Forschungsergebnisse des Jahres 1979. Institut für Landwirtschaftsmechanisierung, Akademie für Landwirtschaft in Poznań.
- [6] *Malec, E. u. T. Caliński*: Die Analyse der Mehrfachregression mit Auswahl der besten Teilmenge von unabhängigen Variablen. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, LXIV.
- [7] *Olsen, H.J.*: Torsional shear tests in agricultural soil research. Swedish University of Agricultural Sciences. Rapport 68. Uppsala 1981.
- [8] *Soltyński, A.*: Slip sinkage of a model pneumatic — tyred vehicle. Journal of Terramechanics Bd. 2 (1965) Nr. 3.
- [9] *Wong, J.Y.*: Data processing methodology in the characterization of the mechanical properties of terrain. Journal of Terramechanics Bd. 17 (1980).
- [10] *Wiendieck, K.W.*: Stress-displacement relations and terrain vehicle mechanics: a critical discussion. Journal of Terramechanics Bd. 5 (1968) Nr. 3.
- [11] *Blaszkiewicz, Z., J. Kozicz u. L. Piechnik*: Einfluß des Schlupfes und des Druckes der Treibräder auf die Aggregation des lockeren Bodens auf Scherebenen. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 1986.
- [12] *Blaszkiewicz, Z.*: Einfluß des Schlupfes der Schleppertreibräder auf Verdichtung und Wasser-Luft-Eigenschaften leichten Bodens. Diss. Akademie der Landwirtschaft in Poznań, 1981.
- [13] • *Zwonkow, W.W.*: Wassererosion und Winderosion der Erde. Izdatelstwo Akademii Nauk SSSR. Moskwa.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1986

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form — durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren — ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. — All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. — Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.