

## DAS MECHANISCHE VERHALTEN DES ACKERBODENS BEI BELASTUNGEN, UNTER ROLLENDEN RÄDERN SOWIE BEI DER BODENBEARBEITUNG

Von Walter Söhne

Die Konstruktion aller landwirtschaftlichen Feldmaschinen hängt irrendwie von den Eigenarten und der Beschaffenheit des Ackerbodens ab. Bei Bodenbearbeitungsgeräten wie Pflügen, Fräsen, Walzen bedarf das keiner Begründung, auch nicht bei Rüben- und Kartoffelerntemaschinen.

Die Zugkraft und das zulässige und notwendige Gewicht eines Ackerschleppers wird ebenfalls in entscheidendem Masse von der Beschaffenheit des Ackerbodens beeinflusst. Aber auch bei Erntemaschinen, von der Mähmaschine bis zum Mähdrescher oder bei Drillmaschinen und besonders beim Ackerswagen müssen die Räder bzw. Reifen entsprechend den Fahrbahnverhältnissen auf dem Felde dimensioniert werden, wobei sie zum Teil mit ihren Rädern auch Drehmomente zum Antrieb des Arbeitsmechanismus aufnehmen können müssen.

Der Ingenieur, der diese Maschinen baut, muss sich also mit den Eigenarten des Ackerbodens vertraut machen. Es ist dabei die Aufgabe der Wissenschaft, die Gesetzmässigkeiten, die bei der Wechselwirkung zwischen Maschine und Ackerboden auftreten, in einer landtechnischen Bodenmechanik zu ergründen. Der Boden tritt dabei in einer grossen Vielfalt der Erscheinungsformen auf und gehorcht nicht so verhältnismässig einfachen Gesetzen wie der Baustoff Stahl für den Konstrukteur oder das Medium Luft oder Wasser für den Strömungstechniker.

Das Ziel der folgenden Ausführungen ist, einige Gesetzmässigkeiten beim Ackerboden unter dem Blickwinkel des Ingenieurs zu zeigen und Nutzwendungen daraus zu ziehen.

### A. Verformung des Ackerbodens unter dem Einfluss äusserer Druckkräfte

Ein Boden kann sich beim Aufbringen einer Last elastisch verformen, plastisch verformen (fliessen) und verdichten. Das Verdichten ist dabei der wichtigste Fall. Der Boden besteht bekanntlich aus der festen Bodensubstanz, dem Anteil Wasser und dem Anteil Luft. Den prozentualen Anteil Luft + Wasser am Gesamtvolumen nennt man das Porenvolumen.

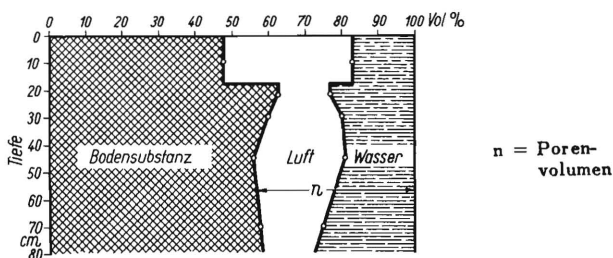


Bild 1. Bodenprofil mit Pflugsohlenbildung (nach v. Nitzsch [1]).

Bild 1 zeigt die Verteilung dieser drei Anteile in Abhängigkeit von der Tiefe, wie sie von v. Nitzsch [1] auf einem Acker gemessen wurden. In der Ackerkrume beträgt das Porenvolumen je nach der Jahreszeit etwa 52–44%. Bei geringeren Porenvolumina spricht man von Bodenverdichtungen, die das Wachstum der Pflanzen ungünstig beeinflussen können. Bild 1 zeigt unterhalb der Bearbeitungsgrenze eine solche Strukturschädigung (Pflugsohle). Durch die Bodenbearbeitung, Pflügen oder Fräsen, kann das Porenvolumen der Ackerkrume bis über 60% steigen; es ist dies aber ein labiler Bodenzustand, der sich durch Setzen bald wieder normalen Werten von etwa 50% nähert.

Füllt man einen Versuchszylinder mit lockerem Boden und belastet diesen mit einem Kolben, so kann man anfangs den Boden mit geringer Kraft weitgehend zusammendrücken, braucht aber dann ganz erhebliche Kräfte, um ihn noch um ein Geringes weiter zu verdichten. Bild 2 zeigt den Anstieg der Flächenpressung  $p$  über dem auf die Zylinderhöhe bezogenen Kolbenweg  $s/h_0$ . Trägt man das Porenvolumen bei diesem Versuch über der entsprechenden

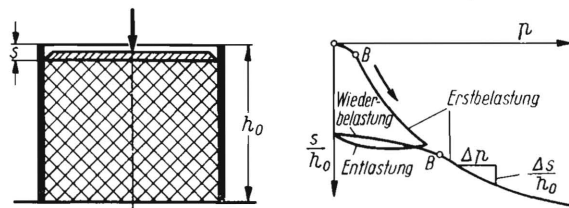


Bild 2. Kraftverlauf beim Zusammendrücken eines lockeren Bodens in einem geschlossenen Versuchszylinder mit einer Entlastung während des Versuches.

Flächenpressung auf, so erhält man eine Abhängigkeit nach Bild 3 (Kurve a). Anstelle des Porenvolumens  $n$  bedient sich die Bodenmechanik häufig der Porenziffer  $\epsilon$ . Sie bedeutet das Verhältnis des Porenvolumens zur festen Substanz. Die Beziehung zwischen Porenvolumen und Porenziffer lautet:  $\epsilon = n/1-n$ .

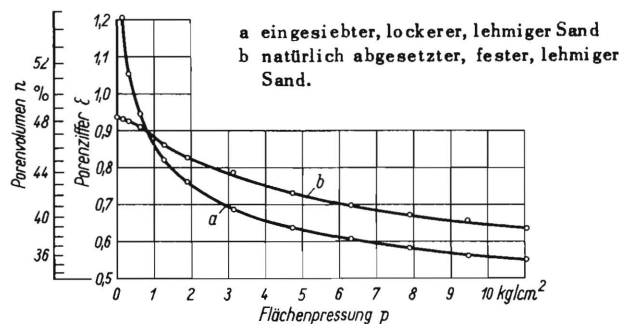


Bild 3. Zusammendrückbarkeit eines lehmigen Sandbodens bei verschiedenem Lagerungszustand. 13% Feuchtigkeit

Zwischen Porenziffer und dem aufgetragenen Druck besteht bei der Verdichtung eines lockeren, eingesiebten Bodens die Beziehung  $\epsilon = A \ln p + C$  [7]. Vom Einfluss auf das Porenvolumen-Druckdiagramm ist die Bodenart, die Feuchtigkeit und der Bodenzustand, bei dem der Versuch begonnen wurde. Bei einem dichtgelagerten Boden, den man in ungestörtem Zustand mit einem grossen Stechzylinder entnimmt, ergibt sich z. B. das Diagramm Bild 3 (Kurve b). Dabei ist es möglich, dass sich der natürlich gelagerte Boden nicht so stark zusammendrücken lässt wie bei gleicher Last der vorher gelockerte, eingesiebte Boden. Einen besonders grossen Einfluss hat der Feuchtigkeitsgehalt. Ein nasser Boden hat eine geringere innere Reibung und geringere Kohäsion, da die einzelnen Krümel sich leichter verformen und die Luftporen ausfüllen.

Aus Bild 4 ist zu ersehen, dass ein ursprünglich lockerer Boden mit 10 bis 20 % Feuchtigkeit zu seiner Verdichtung auf 50 % Porenvolumen einen Druck von

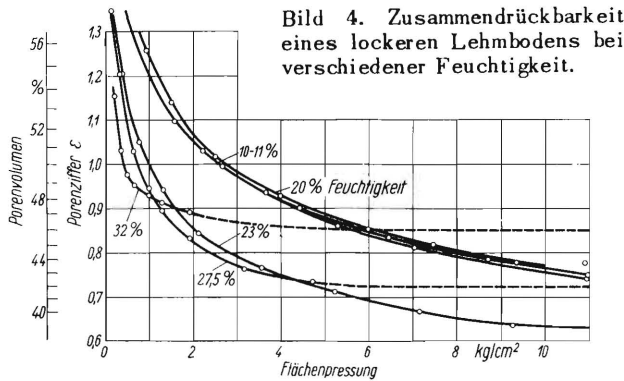


Bild 4. Zusammenrückbarkeit eines lockeren Lehm Bodens bei verschiedener Feuchtigkeit.

etwa 2,5 kg/cm<sup>2</sup> benötigt. Wird aber ein bestimmter Feuchtigkeitsgehalt überschritten, so genügen

bei 23 Gew. % Feuchtigkeit	1,0 kg/cm <sup>2</sup>
„ 27 „	0,7 „
„ 32 „	0,4 „

um den Boden auf 50 % Porenvolumen zu verdichten. Nasse Böden lassen sich bei kurzzeitiger Belastung nur auf ein Porenvolumen, das dem Wassergehalt entspricht, verdichten.

Bei dichtgelagertem, trockenem, hartem Boden erfolgt unter den Drücken bis 2 oder 3 kg/cm<sup>2</sup> keine nennenswerte zusätzliche Verdichtung.

Von der Verdichtung ist der Fall der plastischen Verformung, des sogenannten Fließens des Bodens zu unterscheiden. Ein dicht gelagerter, sehr nasser Boden, bei dem fast alle Poren mit Wasser gefüllt seien, werde von einem Rad überrollt, das eine tiefe Spur hinterlässt. In diesem Falle tritt kaum noch ein Verdichten, wohl aber ein starkes Fließen ein, das u.U. mit Wurzelzerreissungen verbunden ist.

Schliesslich ergibt sich noch der Fall einer kleinen elastischen Verformung. Verdichtung, plastische und

elastische Verformung treten im allgemeinen gleichzeitig auf, wobei je nach dem Bodenzustand und der Feuchtigkeit das eine oder andere überwiegt. Die Zeitdauer der Belastung hat auf die Verformung einen mehr oder weniger grossen, auf das plastische Fließen aber einen entscheidenden Einfluss. Weiterhin kann durch schwingende Belastungen die Verdichtung erheblich gesteigert werden.

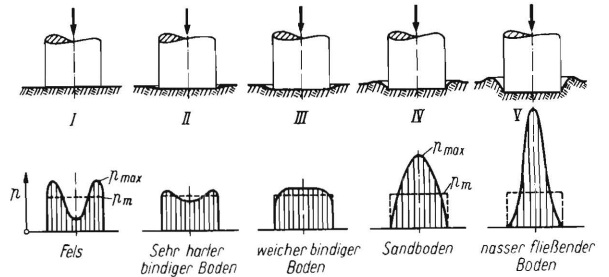


Bild 5. Sohlendruckverteilung unter Stempeln mit gleicher Belastung (nach Scheidig [2]).

### B. Druckspannungen als Folge äusserer Druckkräfte

Im vorigen Abschnitt wurde die Beziehung zwischen einer gleichmässig angenommenen Druckspannung in einem Versuchszylinder (also bei verhinderter Seitenausdehnung) und der Verdichtung betrachtet. Bevor man jedoch daraus Rückschlüsse auf das Verhalten des Bodens in der freien Natur, also eines seitlich und in der Tiefe unbegrenzten Bodens zieht, muss man wissen, wie gross die Druckspannung unter einer Last an der Bodenoberfläche ist und wie sich diese Spannung nach der Tiefe hin abbaut. Die Flächenpressung an der Oberfläche kann überschlägig nach der Formel  $p_m = \text{Last } P / \text{Fläche } F$  berechnet werden. Diese Formel ist jedoch nur eine grobe Näherung. Je nach der Grösse der Belastungsflächen und der Bodenart kann die Flächenpressung an der Oberfläche von dem Mittelwert  $p_m$  erheblich abweichen und die im Bild 5 gezeigte Verteilung annehmen [2].

Die Druckverteilung unter Gummireifen hängt im starken Masse von der Boden Härte, dem Reifeninnendruck und auch von der Steifigkeit des Reifenaufbaues ab. Auf hartem, trockenem Boden, bei dem

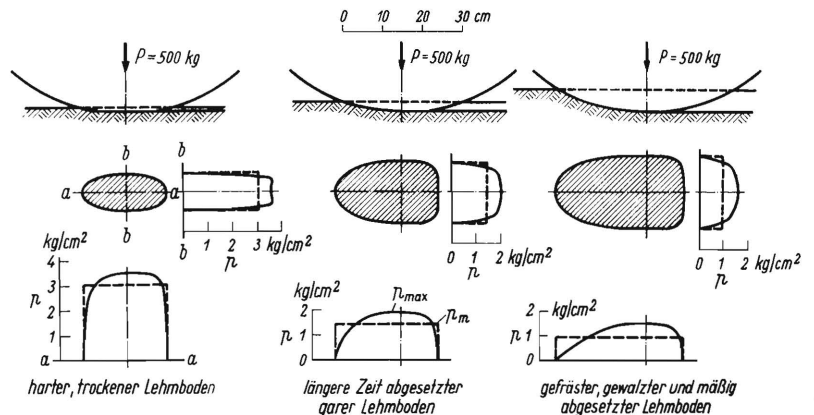


Bild 6. Abdruckflächen, Spurtiefen und Flächenpressung unter einem Ackerwagenreifen 170-20 AW/3 atü auf verschiedenen festen Böden.

kaum eine Spur eingedrückt wird, ist die Flächenpressung durch die Steifigkeit des Reifenaufbaues 10–30 % höher als der Reifeninnendruck (Bild 6). Auf weichem, nachgiebigem Boden, bei dem eine tiefe Spur eingedrückt wird und der Reifen daher eine grosse Auflagefläche hat, kann die Flächenpressung erheblich geringer sein als der Reifeninnendruck.

Für die Verteilung und den Abbau der Druckspannung nach der Tiefe und nach der Seite gilt folgende Gesetzmässigkeit: Die Druckspannung baut sich unter den Rändern der Last zur Seite hin ab, sodass man in einer gewissen Tiefe eine glockenförmige Druckverteilung erhält. Von besonderem Einfluss auf den Abbau der Druckspannungen ist die Grösse der Lastfläche. Wir sehen aus Bild 7, dass nicht allein die Grösse der spezifischen Druckspannung an der Oberfläche eine Rolle spielt, sondern auch die Grösse der Lastfläche. Nur in geringer Tiefe ist die Flächenpressung an der Oberfläche entscheidend. In grösserer Tiefe kommt es auf das Produkt aus Lastfläche und spez. Flächenpressung an. Einen gewissen Einfluss hat die Form der Lastfläche. Unter der elliptischen Lastfläche erfolgt der Abbau der Druckspannungen im Boden etwas schneller als unter der kreisförmigen Lastfläche (Bild 8).

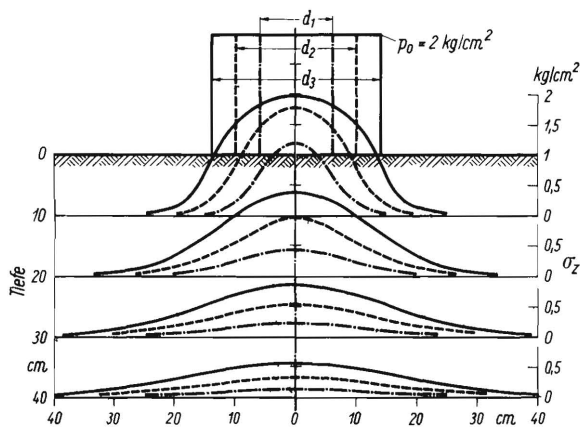


Bild 7. Druckverteilung unter Kreisflächenlasten gleicher Flächenpressung, aber verschieden grossen Druckflächen.

$d_1 = 12 \text{ cm } \emptyset$	$d_2 = 20 \text{ cm } \emptyset$
$F_1 = 113 \text{ cm}^2$	$F_2 = 314 \text{ cm}^2$
$P_1 = 226 \text{ kg}$	$P_2 = 628 \text{ kg}$
$d_3 = 28 \text{ cm } \emptyset$	
$F_3 = 615 \text{ cm}^2$	
$P_3 = 1230 \text{ kg}$	

Auf Bild 9 sind die Linien gleichen vertikalen Druckes im Boden unter verschiedenen Reifen und Reifenbelastungen auf hartem Lehmboden, der sich kaum verformt, aufgezeichnet. Die Flächenpressung an der Oberfläche ist in allen Fällen gleich und zwar etwa  $1,1 \text{ kg/cm}^2$ , entsprechend einem Reifeninnendruck von  $0,8 \text{ atü}$ . Trotz dieser gleichen Flächenpressung an der Oberfläche reichen aber unter den

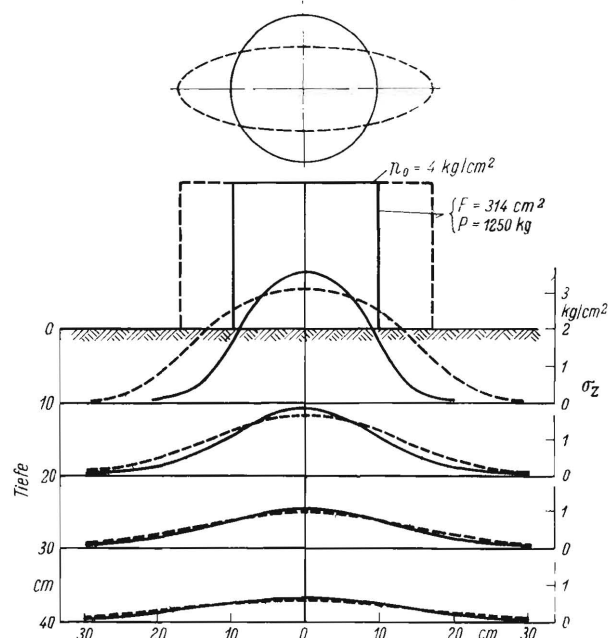


Bild 8. Druckverteilung unter einer Kreis- und Ellipsenfläche gleicher Grösse bei derselben Last.

grösseren Reifen mit höherer Last die Linien gleicher Druckspannungen sehr viel tiefer herab.

### C. Die horizontalen Kräfte und die Schubspannungen im Boden und der Schlupf der Räder

Neben den vertikalen Druckkräften auf den Boden und den davon herrührenden Druckspannungen im Boden sind die horizontalen Kräfte und die von ihnen herrührenden Schubspannungen für die Verformung und Verdichtung des Bodens von Bedeutung und spielen eine besondere Rolle bei der Entstehung des Schlupfes der Räder. Bild 10 zeigt die an gezogenen und ziehenden Rädern angreifenden Kräfte und Momente; dabei handele es sich in allen Fällen um stationäre Betriebszustände, d.h. es sollen weder Beschleunigungen noch Verzögerungen auftreten. Der Rollwiderstand wird in allen Fällen mit  $0,16 \cdot G$  gleich angenommen<sup>1)</sup>.

1) Diese Annahme wurde hier der Einfachheit halber getroffen. In Wirklichkeit wird bei gleichen Rädern, gleichem Boden und gleicher Fahrgeschwindigkeit in den verschiedenen Fällen der Rollwiderstand etwas verschieden sein.

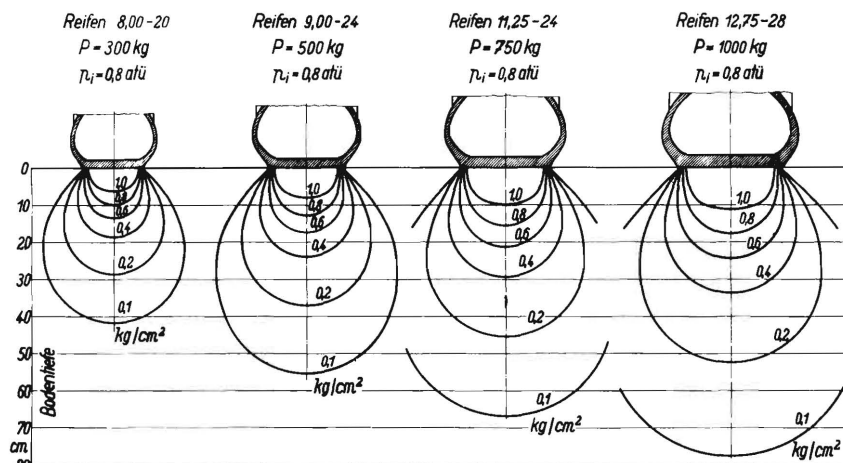


Bild 9. Druckverteilung unter Schlepperrädern auf hartem Lehmboden.

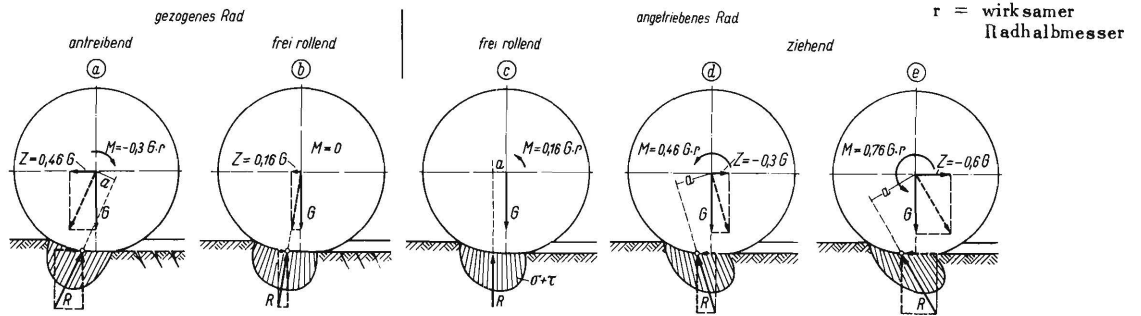


Bild 10. Gleichgewicht der äusseren Kräfte und Momente an gezogenen und angetriebenen Rädern bei gleichem Rollwiderstand und stationärem Betriebszustand.

In der Berührungsfläche zwischen Rad und Boden ist jeweils die geometrische Summe aus Normalspannung  $\sigma$  und Schubspannung  $\tau$  gezeichnet. Die resultierenden Bodenkraften  $R$  ergeben sich als das Integral der Normal- und Schubspannungen in der

Infolge dieser Druck- und Schubkräfte auf den Boden treten bei diesen Rädern Bodenverformungen nach Bild 11 auf. Massgebend für die Grösse der horizontalen Bodenverformung und die Bewegung der einzelnen Bodenteilchen ist die horizontale Spannungskomponente im Boden. Für die gesamte Horizontal- und Vertikalbewegung ist die Form einer 6 charakteristisch. Das letzte Stück dieser 6 wird von der elastischen Rückverformung nach dem Überrollen hervorgerufen; von G. Gliemeroth wurden solche Bodenverformungen unter einem leer fahrenden Schlepper und unter der Raupe gefilmt [4]. Auch im Falle (c), bei dem die resultierende Bodenkraft keine horizontale Komponente hat, wohl aber die in Bild 10 gezeigte Spannungsverteilung, tritt diese 6 auf. Zunächst wird der Boden etwas nach vorn gedrückt, im weiteren Verlauf des Überrollens wird diese Bewegung zum Teil wieder rückgängig gemacht.

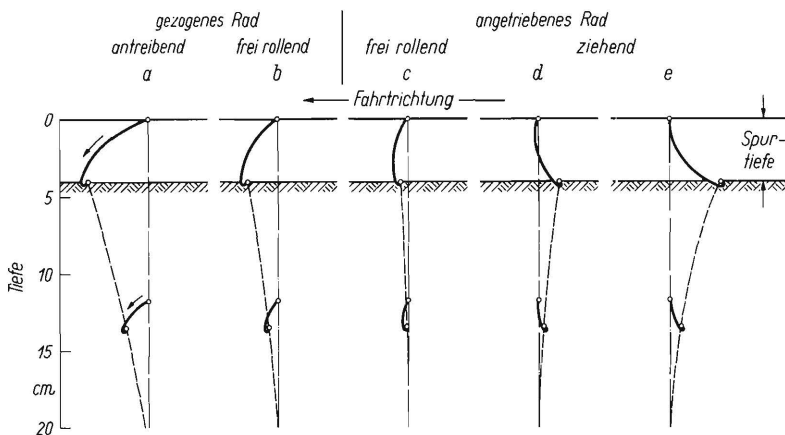


Bild 11. Bodenbewegung an der Oberfläche und in der Tiefe unter gezogenen und angetriebenen Rädern nach Beobachtungen in der Bodenrinne.

Berührungsfläche. Dabei ändert die horizontale Bodenkraftkomponente vom Fall des gezogenen Rades (a und b) zum Fall des ziehenden Rades (d und e) ihre Richtung. Im Falle c des Rades, das weder zieht noch gezogen wird, ist sie gleich Null.

Beim gezogenen, frei rollenden Rad (b) steht die Resultierende aus Zugkraft  $Z$  und Gewicht  $G$  im Gleichgewicht mit der resultierenden Bodenkraft  $R$ .

Beim gezogenen, antreibenden (bzw. gebremsten) Rad (a), wie es u.a. an Mähmaschinen vorkommt, wird ein Drehmoment an der Achse abgenommen. Die Resultierende aus Zugkraft und Gewicht ist wiederum im Gleichgewicht mit der resultierenden Bodenkraft. Das abgenommene Moment ist entgegengesetzt gleich der resultierenden Bodenkraft mal dem Abstand  $a$  zur Radachse.

Bei dem angetriebenen Rad (c), das nur den eigenen Rollwiderstand zu überwinden hat und bei dem keine horizontalen Kräfte an der Achse auftreten (also z.B. beim unbeschleunigt fahrenden Schlepper, dessen Vorderräder keinen Rollwiderstand haben sollen) ist das antreibende Moment entgegengesetzt gleich der senkrecht wirkenden Bodenkraft ( $R = -G$ ) mal dem Abstand  $a$  zur Radachse.

Der Fall des angetriebenen, ziehenden Rades (d und e) tritt beim Schlepper auf, der eine bestimmte Zughakenkraft abgibt. Die horizontale Bodenkraftkomponente ist jeweils entgegengesetzt gleich der Zugkraft ( $= 0,3$  bzw.  $0,6 G$ ). Das antreibende Moment ist entgegengesetzt gleich der resultierenden Bodenkraft  $R$  mal dem Abstand  $a$  zur Radachse.

Die Bilder 12–17 zeigen einige Aufnahmen der Verformung des Bodens unter ziehenden und gezogenen Rädern aus der Bodenrinne, aus denen besonders die horizontale Bodenverformung in Fahrtrichtung unter gezogenen und entgegengesetzt zur Fahrtrichtung unter ziehenden Rädern hervorgeht. Die Bodenverformung ist die Hauptursache des grossen Schlupfes der Räder auf nachgiebigem Ackerboden. Der von der Verformung der Gummireifen herrührende Anteil ist demgegenüber klein.

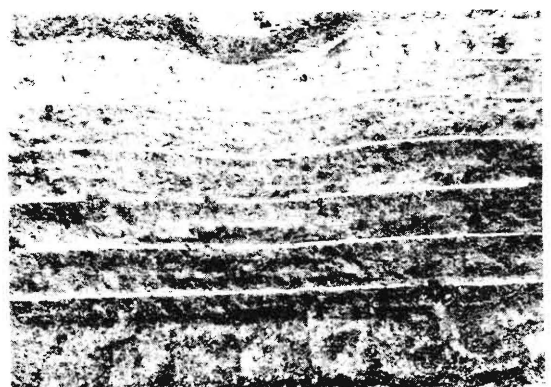


Bild 12. Vertikale Bodenverformung unter einem Schlepperreifen.



Bild 13. Horizontale Bodenverformung unter einem gezogenen Schlepperreifen (Die Gipsstränge liegen schräg untereinander).

Bild 18 soll die Vorstellung vom Entstehen des Schlupfes erleichtern. Es zeigt oben eine Zykloide, also die Bahnkurve, die ein Punkt auf der Lauffläche des Reifens beschreibt, daneben die verzerrten Zykloiden eines gebremsten und eines ziehenden Rades mit  $+20\%$  und  $-20\%$  Schlupf. Die vergrößert herausgezeichnete Zykloidenschleife eines ziehenden Rades zeigt, wie ein Bodenteilchen von A nach B bewegt wird. Verdeutlicht wird dieser Vorgang in der daneben stehenden Darstellung: Zwei benachbarte Bodenteilchen werden von einem Profilstollen mitgenommen, während sich die Radachse über sie hinbewegt.

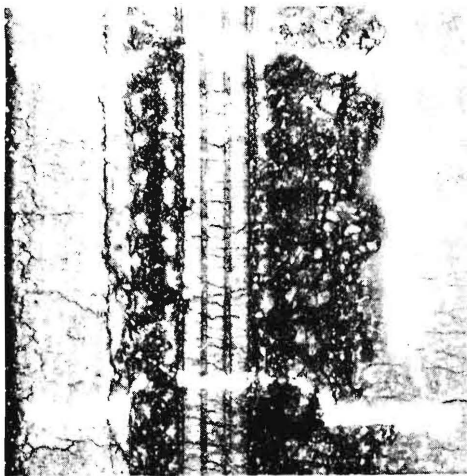


Bild 14. Horizontale Bodenverformung in der Spur eines gezogenen Reifens, auf dessen Achse ein Bremsmoment wirkte.



Bild 15. Horizontale Bodenverformung unter der Spur eines gezogenen Reifens, auf dessen Achse ein Bremsmoment wirkte.  
Längsschnitt durch den Boden unter der Spur.

Ein Schlepper fährt unter optimalen Bedingungen auf dem Acker im allgemeinen mit 12 bis 18% Schlupf, d.h. mit einer Verlustleistung derselben Grösse. Es ist allgemein durch frühere Messungen von Meyer und Kliefoth sowie von Mc Kibben bekannt und



Bild 16. Horizontale Bodenverformung in der Spur eines ziehenden Schlepperreifens.

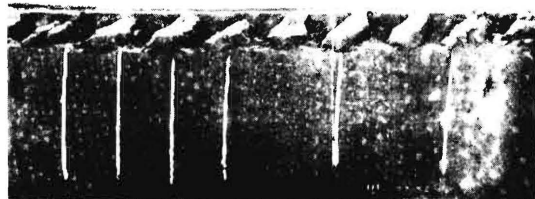


Bild 17. Horizontale Bodenverformung unter der Spur eines ziehenden Schlepperreifens.

wurde durch umfangreiche Messungen von G. Bock [3] bestätigt, dass man den Schlupf durch grössere Raddurchmesser verringern kann. Bild 19 soll eine Vorstellung geben, weshalb bei einem grösseren Rad der Schlupf geringer ist. Das Bild zeigt die Zykloiden der Reifen 9-40 und 9-24 und vergrößert herausgezeichnet die Schleifen der Zykloiden. Bei gleichem Schlupf von 20% transportiert

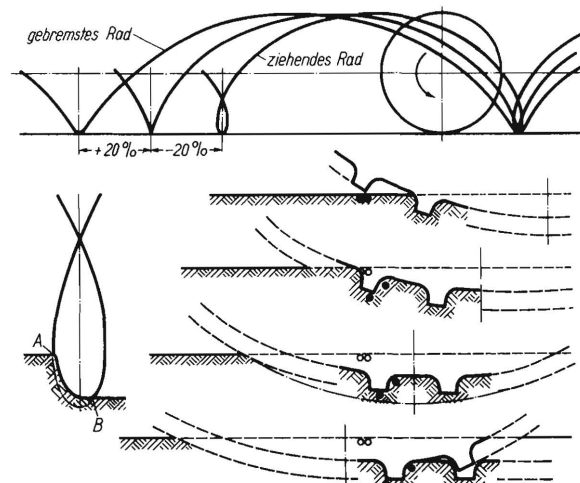


Bild 18. Der Schlupf des ziehenden Rades, sein Einfluss auf die Zykloidenbahn und die Bodenverformung.

der grosse Reifen ein Bodenteilchen in der Spur weiter zurück (von A nach B) als der kleine (von A bis B). Gleichzeitig ist die Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden grösser als beim kleineren Rad (die beiden Aufdruckflächen in Bild 19 zeigen den Bereich, der sich gleichzeitig verformt), es wird also ein grösseres Bodenvolumen gleichzeitig verformt. Beide Einflüsse, nämlich die grösseren Verformungswege eines grösseren Bodenvolumens, erfordern beim grösseren Rad und gleichem Schlupf eine grössere horizontale Bodenkraft, d.h. aber, das grössere Rad leistet eine grössere Zugkraft. Bei gleicher Zugkraft und etwa gleicher Bodenverformung ist bei dem grösseren Rad der Schlupf und damit der Schlupfverlust geringer.

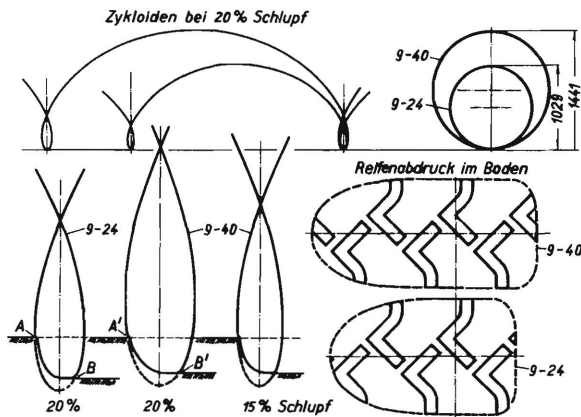


Bild 19. Zykloiden schlüpfender Reifen verschiedenen Durchmessers und Einfluss des Raddurchmessers auf den Schlupf.

Bild 20 gibt die Messergebnisse von G. Bock an Reifen gleicher Breite, aber verschiedenen Durchmessern wieder, und zwar die Zugkraft von Schlepperrädern in Abhängigkeit vom Schlupf. Bild 21 zeigt die Zugkraft bei einem Schlupf von 10 %, 20 % und 30 %. Der Forderung nach grossem Raddurchmesser stehen grössere Drehmomente, schwereres Getriebe und schwerere und teurere Reifen und u.U. eine höhere Schwerpunktlage entgegen. Der

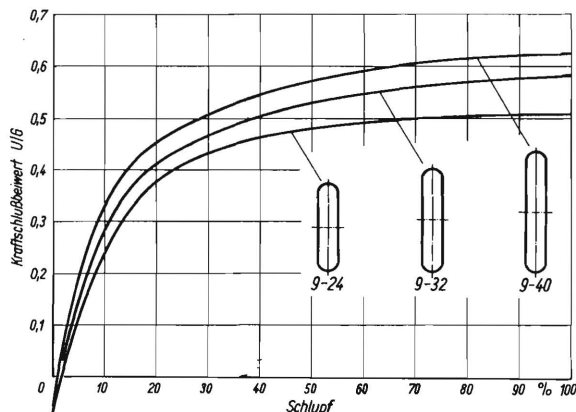


Bild 20. Kraftschlussbeiwert (Zugkraft) bei gleicher Reifenbreite in Abhängigkeit von Reifendurchmesser und Schlupf (nach G. Bock).

Boden: lehmiger Sand, Getreidestoppel

U = Umfangskraft ≡ Zugkraft  
G = Radlast.

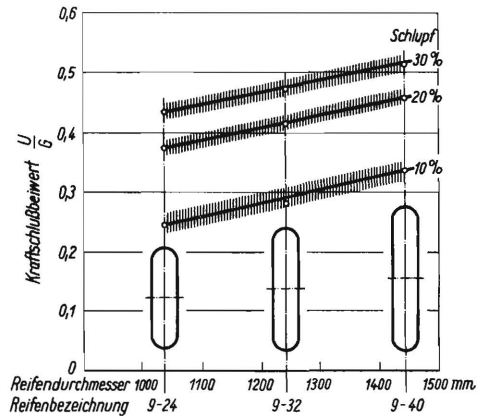


Bild 21. Kraftschlussbeiwert (Zugkraft) bei gleicher Reifenbreite in Abhängigkeit vom Reifendurchmesser bei 10, 20 und 30 % Schlupf (nach G. Bock).  
Boden: lehmiger Sand, Getreidestoppel.

Konstrukteur hat den besten Kompromiss aus diesen widerstrebenden Forderungen zu ziehen.

Für die maximale Zugspannung in einem Erdstollen unter dem Reifenprofil ist die Kohäsion und der Reibungsbeiwert massgebend (Bild 22). Mit zunehmender Feuchtigkeit wird die Kohäsion und der Reibungsbeiwert kleiner und die maximal übertragbare Zugkraft nimmt ab, während der Schlupf ansteigt.

Kann man die erforderliche Zugkraft nicht herabsetzen, so muss man das Gewicht erhöhen mit all den nachteiligen Folgen einer Bodenverdichtung,

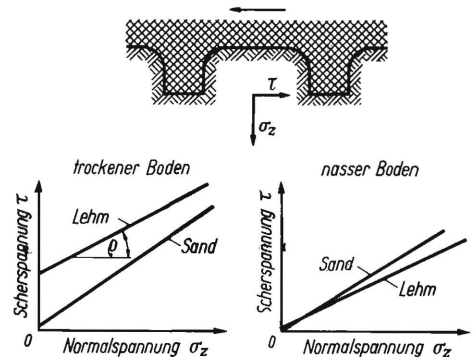


Bild 22. Schubspannung  $\tau$  im Erdstollen unter einem Reifenprofil. Die Scherung ist die Bruchschubspannung.

$$\tau = c + \sigma_z \operatorname{tg} \rho$$

$\rho$  = Winkel der inneren Reibung.

	$\rho$	Kohäsion c
Sand	37 - 32°	0 kg/cm <sup>2</sup>
Löss	35 - 30°	0,1 - 0,3 „
Lehm	30 - 26°	0,2 - 0,5 „
Ton	28 - 20°	0,5 - 10 „

(nach Kögler und Scheidig [7]).

die besonders bei feuchtem Boden auftreten können. Für die Verdichtung im Boden unter der Spur ist massgebend die Druckspannung, die sich aus der resultierende Bodenkraft aus Radlast und Zugkraft:

$$R = \sqrt{G^2 + Z^2}$$

(s. Bild 10) ergibt. Für die Verdichtung einer dünnen Grenzschicht unmittelbar an der Spuroberfläche

spielt der Schlupf eine grosse Rolle. Solche Grenzschichten, die durch lockeren Boden beim Eggen wieder bedeckt werden können, können nach Untersuchungen von *Frese* [8] eine ungünstige Wirkung auf den Pflanzenwuchs ausüben. Im ganzen gesehen kann man folgendes sagen:

Auf trockenem, hartem und abgesetztem Boden richtet auch ein schwerer Schlepper keinen Schaden an. Auf feuchtem und eben bearbeitetem Boden sollte der Reifeninnendruck möglichst gering und das Gewicht so niedrig sein, wie es für die verlangte Zugkraft noch erforderlich ist. Der durch Schlupf in einer dünnen Grenzschicht hervorgerufene Schaden kann dabei durch geeignete Spurlockerer zum Teil wieder beseitigt werden, nicht aber tiefer reichende, von hohem Gewicht und Zugkraft herührende Verdichtungen. Der Schlepper mit möglichst grossem Raddurchmesser und möglichst niedrigem Leistungsgewicht und mit Zusatzgewichten, die für Bestellungsarbeiten im Frühjahr abgenommen werden, dürfte diesen Forderungen am besten entsprechen.

#### D. Die Vorgänge bei der Bodenbearbeitung

Neben den im vorhergehenden behandelten Problemen hat sich eine landtechnische Bodenmechanik auch mit den Vorgängen bei der Bodenbearbeitung als einer zweiten grossen Aufgabe zu beschäftigen. Beim Pflügen z.B. wird ein „Erdbalken“ abgetrennt, durch Biegung, Stauchung, Verdrehung und Scherung verformt, bis er in Krümel oder Schollen zerfällt.

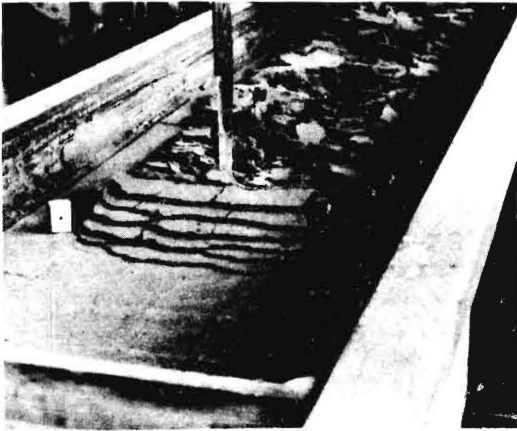


Bild 23. Aufbrechen des Sandes beim Schneiden mit einer schiefen Ebene im Sandkasten.

Die Untersuchung der Elementarvorgänge auf diesem Gebiet wurde zunächst in der Bodenrinne und im Sandkasten mit einfachen Werkzeugen, z.B. schiefen Ebenen oder gewölbten Flächen verschiedener Neigung begonnen. Bild 23 zeigt das Aufbrechen von Sand mit normaler Feuchtigkeit vor und über einer schiefen Ebene. Es bilden sich dabei periodisch Gleitflächen, in denen der Sand emporgleitet. Dieser Vorgang ist in Bild 24 schematisch dargestellt. Dieses Bild zeigt einen Schnitt durch den Sand, in den man vorher Farbebenen ein-

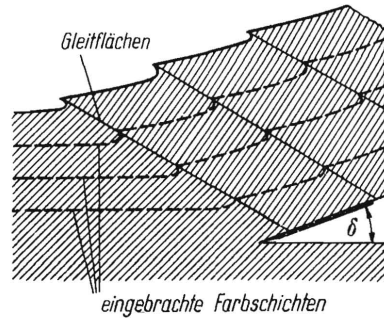


Bild 24. Ausbildung der Gleitflächen beim Schneiden mit einer schiefen Ebene im Sandkasten.

$\delta$  = Schnittwinkel.

gebracht hatte. Bei diesen Versuchen wurde jeweils die Zugkraft gemessen. Es ergab sich bei einem Schnittwinkel  $\delta$  der schiefen Ebene von 16 bis 17° bei konstanter Hubhöhe ein Minimum der Zugkraft. Die Kenntnis des Vorgangs gestattet es, den Anteil der Hub- und Beschleunigungsarbeit, den Anteil der Arbeit zur Überwindung von Reibung und Kohäsion in den Gleitebenen und den Anteil der

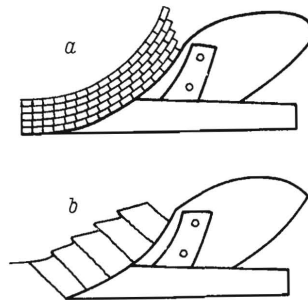


Bild 25. Bodenverformung beim Pflügen (nach *Nichols*).

Reibungsarbeit auf der schiefen Ebene zu berechnen: Danach macht die Hub- und Beschleunigungsarbeit nur etwa 25%, die Reibung und Kohäsion im Sand 40% und die Reibung auf der schiefen Ebene 35% der Gesamtarbeit aus. Ähnliche Überlegungen kann man auch beim Pflügen anstellen. Nach den Beobachtungen von *Nichols* [6] ergibt sich über einem Pflugkörper ein ähnliches Aufbrechen, wie es über der schiefen Ebene beobachtet wurde (Bild 25). Der Vorgang verläuft also nicht nach der Annahme *a* auf diesem Bild, sondern nach *b*. Ein Vor-

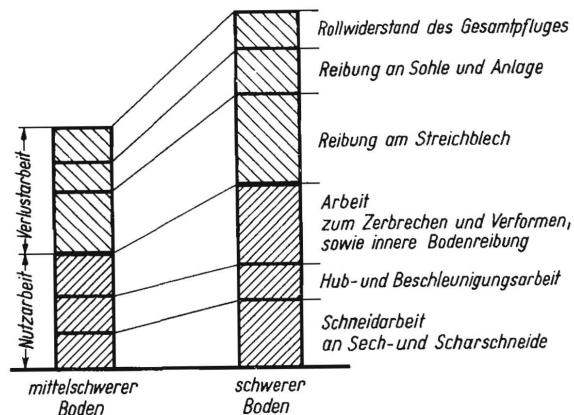


Bild 26. Energiebilanz beim Pflügen.

gang wie unter  $a$  ist nur bei sehr feuchten, sich plastisch verformenden Böden bei sehr langsamer Arbeitsgeschwindigkeit möglich.

Auch für das Pflügen wurde versucht, eine Energiebilanz aufzustellen. Dafür mussten zuvor die Reibungsbeiwerte versuchsmässig bestimmt werden, die bei der Reibung Stahl auf Boden und Boden auf Boden auftreten. Die rechnerisch ermittelte Energiebilanz (Bild 26) zeigt, dass der Anteil der Hubarbeit und Massenbeschleunigung verhältnismässig gering ist. Überraschend gross ist der Anteil der Reibung auf dem Streichblech. Ebenfalls beträchtlich ist der Anteil der Reibung an Sohle und Anlage und des Rollwiderstandes; letztere Grössen können aber am einfachsten durch konstruktive Massnahmen verringert werden.

In Amerika wurden Versuche mit Pflügen gemacht, bei denen ein Teil des Streichbleches durch Rollen oder auf Rollen laufende Bänder ersetzt wurde, um die Reibung zu verringern. Eine solche Konstruktion wird sich aber schwerlich in die Praxis einführen lassen, da die klassische Einfachheit des Streichblechs verloren geht. Ein Gerät von ebensolcher Einfachheit ist die rotierende Pflugscheibe. Auf die Kräfte beim Scheibenpflug, seine konstruktiven Probleme und seine Vor- und Nachteile wird an anderer Stelle eingegangen<sup>2)</sup>.

Es wurde versucht, einen Überblick über einige Arbeiten auf dem Gebiet einer landtechnischen Bodenmechanik zu geben. Auf die Mitteilung von Einzelheiten über die zahlreichen Messungen und

2) s. an anderer Stelle dieses Heftes: W. Söhne, Die Scheibenpflüge.

und Rechnungen musste dabei verzichtet werden. Über die Methoden zur Berechnung der Druckverteilung im Boden wird in dem Aufsatz: „Die Anwendung der Bodenmechanik auf landwirtschaftliche Bodendruckprobleme“ [5] berichtet.

#### Schrifttum

- [1] Nitzsch, W.v.: Bessere Bodenbearbeitung. Berlin 1939. RKTL-Schrift Nr. 70, S. 230.
- [2] Scheidig, A.: Die Berechnungsgrundlagen durchgehender Fundamente usw. Die Bautechnik 9 (1931) S. 273.
- [3] Bock, G.: Reifenprobleme. Aus „Der Schlepper und sein Gerät“. KTL-Berichte über Landtechnik XI. Wolfratshausen/München 1950. S. 16 ff.
- [4] Gliemeroth, G.: Untersuchungen über Verfestigungsvorgänge im Ackerboden unter Rad- und Raupenfahrzeugen. (Wird demnächst veröffentlicht).
- [5] Söhne, W.: Die Anwendung der Gesetze der Bodenmechanik auf landwirtschaftliche Bodendruckprobleme. (Wird demnächst veröffentlicht).
- [6] Nichols, M.L.: Methods of research in soil dynamics as applied to implement design. Alabama Agr. Exp. Sta. Bull. 229, 1929 und Agr. Eng., 13 (1932) 279-285.
- [7] Kögler, F. u. A. Scheidig: Baugrund und Bauwerk. 4. Auflage. Berlin 1944.
- [8] Frese, H.: Studien über die Zusammenhänge zwischen Bodenzustand und Wurzelwachstum. Vortrag auf der DLG-Frühjahrstagung Wiesbaden 1951. (Erscheint demnächst in der Schriftenreihe der FAL, Braunschweig-Völkenrode).

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung  
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode  
Direktor: Prof. Dr. Ing. W. Kloth.

Anschrift des Verfassers: Dr. Ing. Walter Söhne, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft