

REIBUNG UND KOHÄSION BEI ACKERBÖDEN

Von Walter Söhne

Die Kenntnis der Reibungsbeiwerte für Stahl oder Gummi auf Ackerboden, sowie die Kenntnis der Kohäsion und inneren Reibungsbeiwerte beim Abscheren von Boden, ist für die Untersuchung der Vorgänge auf dem Pflugstreichblech bzw. der Kraftübertragung zwischen Reifen und Ackerboden von grosser Bedeutung. Die Reibung zwischen einem Körper und Ackerboden ist wie die Reibung ganz allgemein ein sehr komplexer Vorgang. Zwar gilt das *Coulombsche* Reibungsgesetz $R = \mu \cdot N$, wonach die Reibungskraft proportional der Normalkraft ist, bei bestimmten Bodenfeuchtigkeiten mit guter Genauigkeit. Aber der Reibungsbeiwert μ hängt von verschiedenen veränderlichen Einflüssen wie der Bodenfeuchtigkeit, dem Reibungsweg und der Oberflächenbeschaffenheit ab und streut stark. Noch komplizierter ist der Vorgang beim Abscheren von Boden, z.B. unter den Stollen der Reifen bzw. beim Pflügen, und beim anschliessenden Gleiten von Boden auf Boden.

Zur Untersuchung der Reibung von Stahl oder Gummi auf Boden sowie der Kohäsion beim Abscheren von Boden wurde ein Ringschergerät nach Vorschlägen von *Kloth* entwickelt. Mit diesem Gerät (Bild 1 und 3) wird ein Reibring aus Stahl oder Gummi oder ein Scherring (Bild 2), die mit Scheibengewichten¹⁾ belastet werden, auf dem Boden gedreht, wobei die aufgewendeten Reibungsmomente gemessen und aufgeschrieben werden. Der Scherring muss vor Beginn des Versuches in den Boden eingedrückt werden. Das Reibungsmoment wird von dem Reibring (1) über ein Kardangelenk von der Hauptwelle (2) aufgenommen. Diese Welle ist in dem Rohr (4) gelagert, das seinerseits von dem Gestell (3) gehalten wird. Die in vertikaler Richtung zur Einstellung auf die jeweilige Bodenhöhe frei bewegliche Welle hat in ihrem oberen Teil zwei Einfürsungen, von denen das Reibungsmoment über zwei Kugellager (5) als Kräftepaar auf die obere Scheibe (6) übernommen wird. Von der oberen Scheibe wird das Reibungsmoment

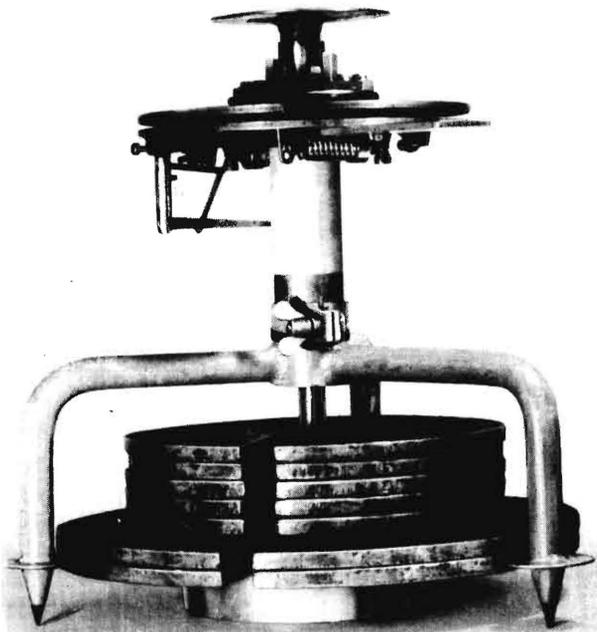


Bild 1. Ringschergerät zum Messen der Abscherfestigkeit und der Reibungsbeiwerte für Stahl bzw. Gummi auf Boden.

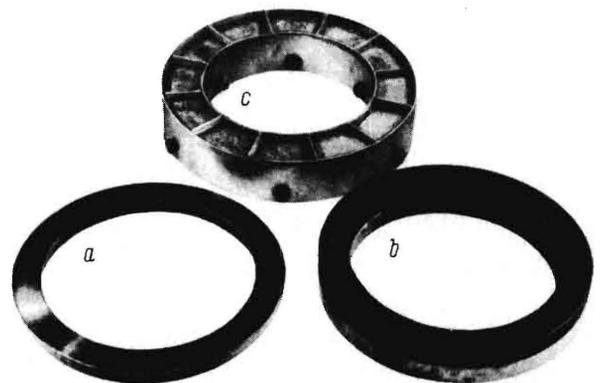


Bild 2. Ringschergerät.
a Stahlreibring, b Gummireibring, c Scherring

über zwei Schraubenfedern (8) auf die untere Scheibe (7) übertragen, die von Hand mit konstanter Geschwindigkeit gedreht wird. Die Dehnung der Schraubenfedern bewirkt eine Verdrehung der oberen Scheibe gegenüber der unteren Scheibe und wird als Mass für das Reibungsmoment benutzt. Diese Verdrehung wird über einen Winkelhebel (9) auf den Hebelarm des Schreibstiftes (10) übertragen. Der Schreibstift schreibt den Verlauf des Drehmomentes in Abhängigkeit vom Drehwinkel auf einen Wachspapierstreifen,

1) Die Scheibengewichte werden aus Stabilitätsgründen jetzt unmittelbar auf den Reibring aufgelegt (vergl. dagegen [1], Bild 20).

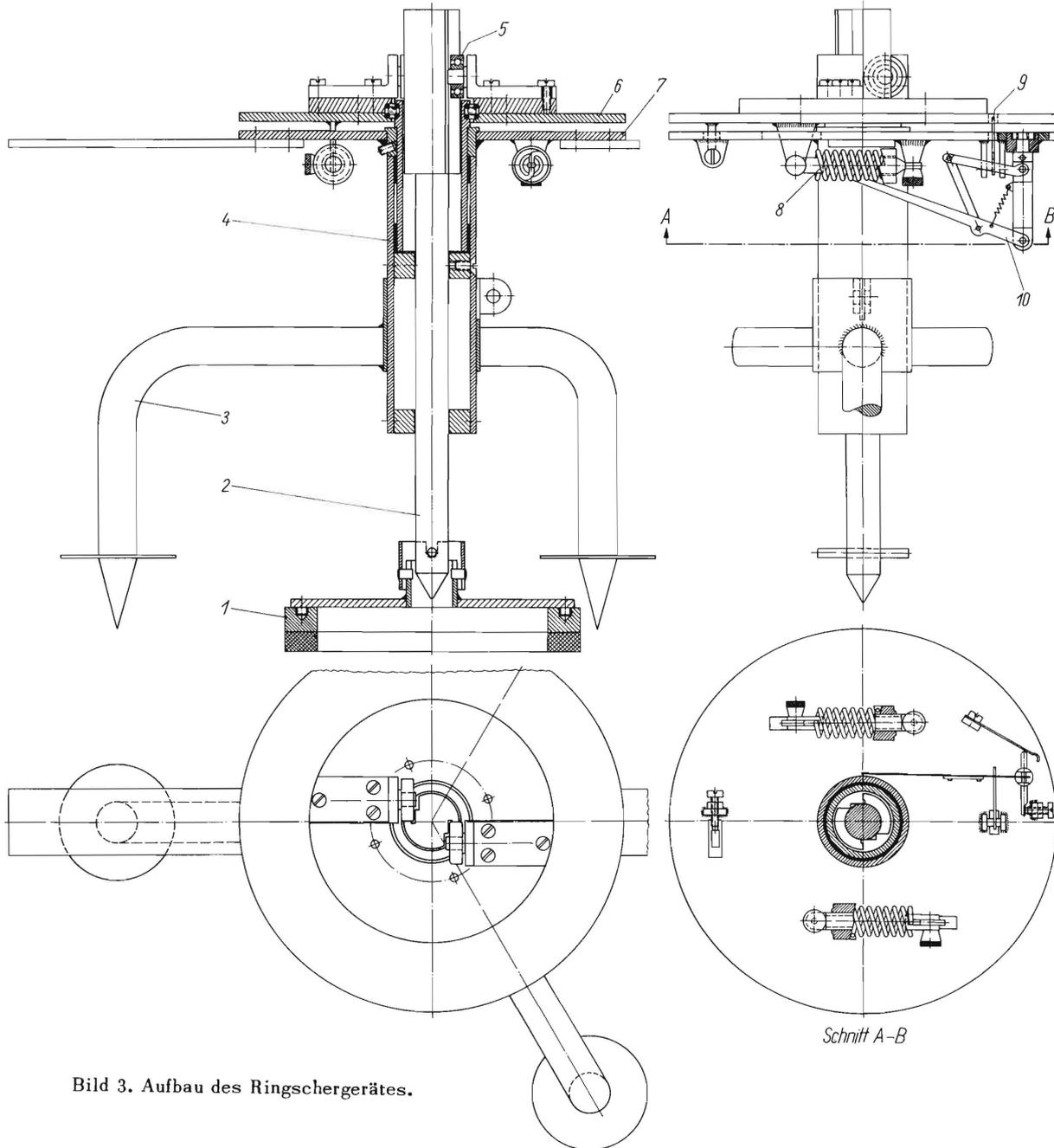


Bild 3. Aufbau des Ringschergerätes.

der um das Rohr (4) gelegt ist. Das besondere Problem bei der Entwicklung des Gerätes war die Aufgabe, das Reibungsmoment von der Welle (2) auf die Messeinrichtung zwischen oberer und unterer Scheibe zu übertragen, ohne dass dabei die vorgegebene Gewichtslast durch Reibungseinflüsse in der Übertragungsstelle gefälscht wird; mit anderen Worten: es musste eine reibungsfreie vertikale Beweglichkeit der Welle (2) gegenüber der oberen Scheibe

(6) bei Übertragung des Reibungsmomentes erreicht werden.

Bei den nachstehenden Untersuchungen wurden drei charakteristische Bodenarten vom leichten zum schweren Boden benutzt, deren Korngrößenverteilung aus Zahlentafel 1 hervorgeht.

Bild 4 bis 6 zeigen einige Diagramme, die bei der Messung der Reibungskräfte bei Stahl auf dem feinsandigen Lehm B aufgenommen wurden. Dabei sind jeweils 3 Parallelversuche übereinander gezeichnet, um eine Vorstellung von der Grösse der Streuung zu geben. Insgesamt wurden einige hundert Messungen bei verschiedenen Bodenarten, Bodenfeuchtigkeiten und Belastungen durchgeführt. Die Reibungskräfte sind über dem „Reibungsweg“ aufgetragen. Unter Reibungsweg ist der Weg verstanden, den der mitt-

Zahlentafel 1. Bodenanalysen

Versuchsboden	Grobsand %	Feinsand %	Schluff %	Ton %
Sand A	92	7	1	0
feinsandiger Lehm B	12	54	26	8
lehmiger Ton C	17	30	26	27

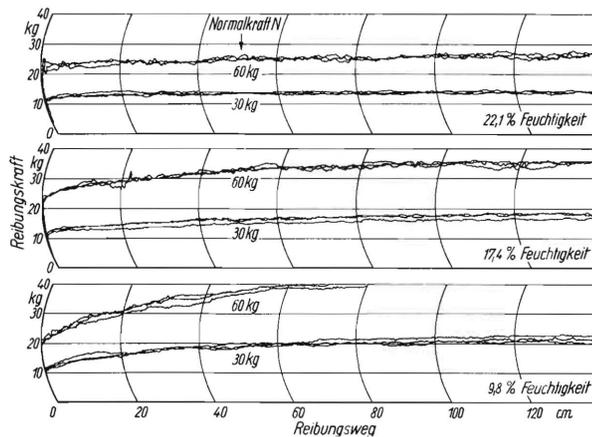


Bild 4 bis 6. Reibungsdiagramme von Stahl auf feinsandigem Lehm B bei drei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten.

lere Durchmesser des Stahlringes bei der Drehung auf dem Boden zurücklegt. Dabei zeigt sich, dass die Reibungskräfte nicht konstant sind, sondern von einem Anfangswert aus mit zunehmendem Reibungsweg zunächst ansteigen und sich einem Endwert nähern, um dann konstant zu bleiben. Nur bei dem nassen Boden mit 22% Feuchtigkeit bleiben die Werte von Anfang an ungefähr konstant.

Da zu vermuten war, dass der Anstieg der Reibungsbeiwerte mit zunehmendem Reibungsweg mit einer Veränderung der Bodenoberfläche zusammenhängt, wurde die Bodenoberfläche vor und nach den Reibungsversuchen mit Hilfe eines Stereoskopes bei rund 50-facher Vergrößerung betrachtet. Der auf diese Weise untersuchte Boden (feinsandiger Lehm B) hat nach der Sieb- und Schlämmanalyse einen grossen Anteil Körner von 20–40 μ . Das war auch deutlich im Stereoskop zu erkennen, wenn man die mittlere Korngrösse mit dem Messokular bestimmte. Bild 7 zeigt eine Mikroaufnahme einer mit einem Messer abgeschnittenen Bodenprobe von 15% Feuchtigkeit. Die Aufnahme kann den subjektiven Eindruck des farbigen, stereoskopischen Bildes nicht wiedergeben. Die Oberfläche ist sehr uneben und porös. Es gibt einzelne herausragende Körneraggregate und Einzelkörner, dazwischen verhältnismässig tiefe Schluchten und Löcher. Wenn man diesen Boden nur durch eine Stahlfläche mit etwa 0,6 kg/cm² belastet, werden die besonders herausragenden Körneraggregate in die Fläche eingedrückt; die Oberfläche wird etwas verdichtet, im ganzen bleibt aber der Boden noch sehr porös, und nur ein kleiner Teil der Oberfläche kommt überhaupt mit der Stahlfläche in Berührung. Hat man dagegen den belasteten Stahlring auf dem Boden dreimal um seine Achse gedreht, wobei der Ring einen Weg von 150 cm zurückgelegt hat, so hat sich die Bodenoberfläche erheblich geändert (Bild 8). Etwa 40 bis 50% der Oberfläche sind durch den darüber gleitenden Ring eingeebnet und verschmiert. Dazwischen verbleiben aber noch zahlreiche Poren. Diese Einebnung der Oberfläche und die damit ver-

bundene Vergrößerung der Berührungsfläche zwischen Stahl und Boden allein ist keine Begründung für das Ansteigen der Reibungskräfte mit zunehmendem Reibungsweg. Man muss vielmehr noch den Einfluss der Feuchtigkeit berücksichtigen.

Der Wassergehalt bei normaler Ackerfeuchtigkeit genügt nicht, eine geschlossene Schmierschicht zwischen Boden und Stahlring zu bilden. Das Wasser füllt nur sehr feine Poren ganz und daneben bei grösseren Poren die Porenwinkel aus und überzieht die Einzelkörner mit einem sehr fest anhaftenden Film. Bei Beginn des Gleitens wird der Stahlring nur von einzelnen herausragenden Körnern getragen. Je länger nun der Stahl auf einem solchen Boden gleitet, umso mehr wird die Bodenoberfläche eingeebnet, wobei eine immer grösser werdende Fläche des Stahls mit dem Wasserfilm der Bodenkörner in Berührung kommt. Die in diesem Film wirkenden Oberflächenspannungen rufen mit grösser werdender Berührungsfläche zunehmende Oberflächenkräfte hervor. Die Verschmierung und zunehmende Einebnung der Bodenoberfläche in Verbindung mit den Oberflächenspannungen des Wassers sind also bei Böden mit normaler Ackerfeuchtigkeit die Ursache des Anstiegs der Reibungskräfte mit zunehmendem Reibungsweg. Der sehr feine, häufig noch unterbrochene Wasserfilm wirkt sozusagen als Antischmiermittel.

Weiterhin wurde derselbe Boden im nassen Zustand mit 24% Feuchtigkeit untersucht. Eine abgeschnittene, aber sonst unberührte Bodenprobe hat wieder eine sehr unregelmässige, rauhe Oberfläche, zeigt aber unendlich viele Lichtreflexe als Folge der Feuchtigkeit, die alle Einzelkörner mit einer jetzt sehr viel dickeren Wasserhaut überzieht und auch etwas grössere Poren ganz ausfüllt (Bild 10). Die Oberfläche ist trotzdem noch sehr porös. Eine feuchte, abgebrochene Bodenprobe zeigt eine noch unregelmässiger, zerklüftete Oberfläche als die abgeschnittene Probe. Wenn dieser Boden mit der Stahlfläche gerieben ist, so hat sich das Bild wieder völlig geändert (Bild 11). Die Oberfläche ist dicht, wengleich sie durch hervorstehende Körner nicht ganz glatt geworden ist. Es sind keine Luftporen mehr zu erkennen, und die Probe scheint völlig luftundurchlässig geworden zu sein. Dem unbewaffneten Auge erscheint die geriebene Bodenoberfläche glänzend speckig. Der Wasserfilm wirkt hierbei, da die Oberflächenspannungen infolge der grösseren Schichtdicke sehr viel kleiner geworden bzw. ganz verschwunden sind, als Schmierschicht und verhindert ein Ansteigen der Reibungskraft (Bild 4).

Ist der normal feuchte Boden mit einem Gummiring gerieben worden, so ist seine Oberflächenschicht ebenfalls dicht gelagert (Bild 9). Im ganzen erscheint sie nicht so geglättet wie bei der Reibung mit dem Stahlring (Bild 8). Der Boden hat eine schwarze Fär-

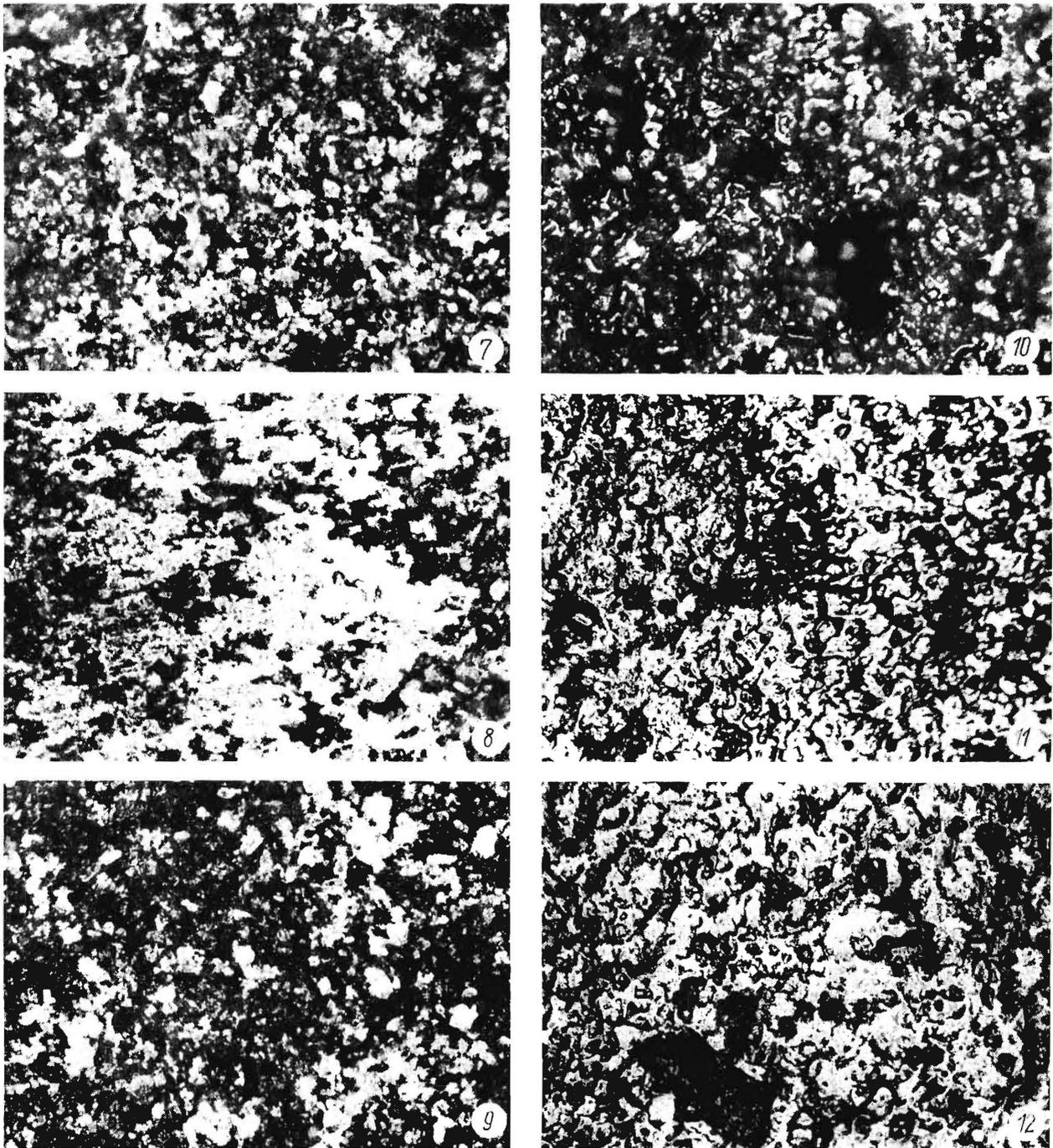


Bild 7 bis 12. Vergrösserte Bodenoberfläche des feinsandigen Lehms *B* bei verschiedener Feuchtigkeit und Behandlung.

Bodenoberfläche	15 % Feuchtigkeit	
	15 %	24 %
geschnitten und unberührt	Bild 7	Bild 10
mit einem Stahlring gerieben ($p = 0,6 \text{ kg/cm}^2$)	Bild 8	Bild 11
mit einem Gummiring gerieben ($p = 0,6 \text{ kg/cm}^2$)	Bild 9	Bild 12

bung angenommen, was von einem feinen Abrieb des Gummis herrührt. Der mit Gummi geriebene nasse Lehm Boden hat ebenfalls eine sehr dichte Oberfläche (Bild 12), immerhin scheint sie etwas porös zu sein im Vergleich mit der vom Stahlring geriebenen Bodenoberfläche.

Reibung Stahl auf Boden

Aus dem Reibungsdiagramm wird der Reibungsbeiwert ermittelt, der das Verhältnis der Reibungskraft zur aufgebrachten Normalkraft angibt. In Bild 13 bis 15 ist das Anwachsen des Reibungsbeiwertes für Stahl auf den Böden *A*, *B* und *C* in Abhängigkeit vom

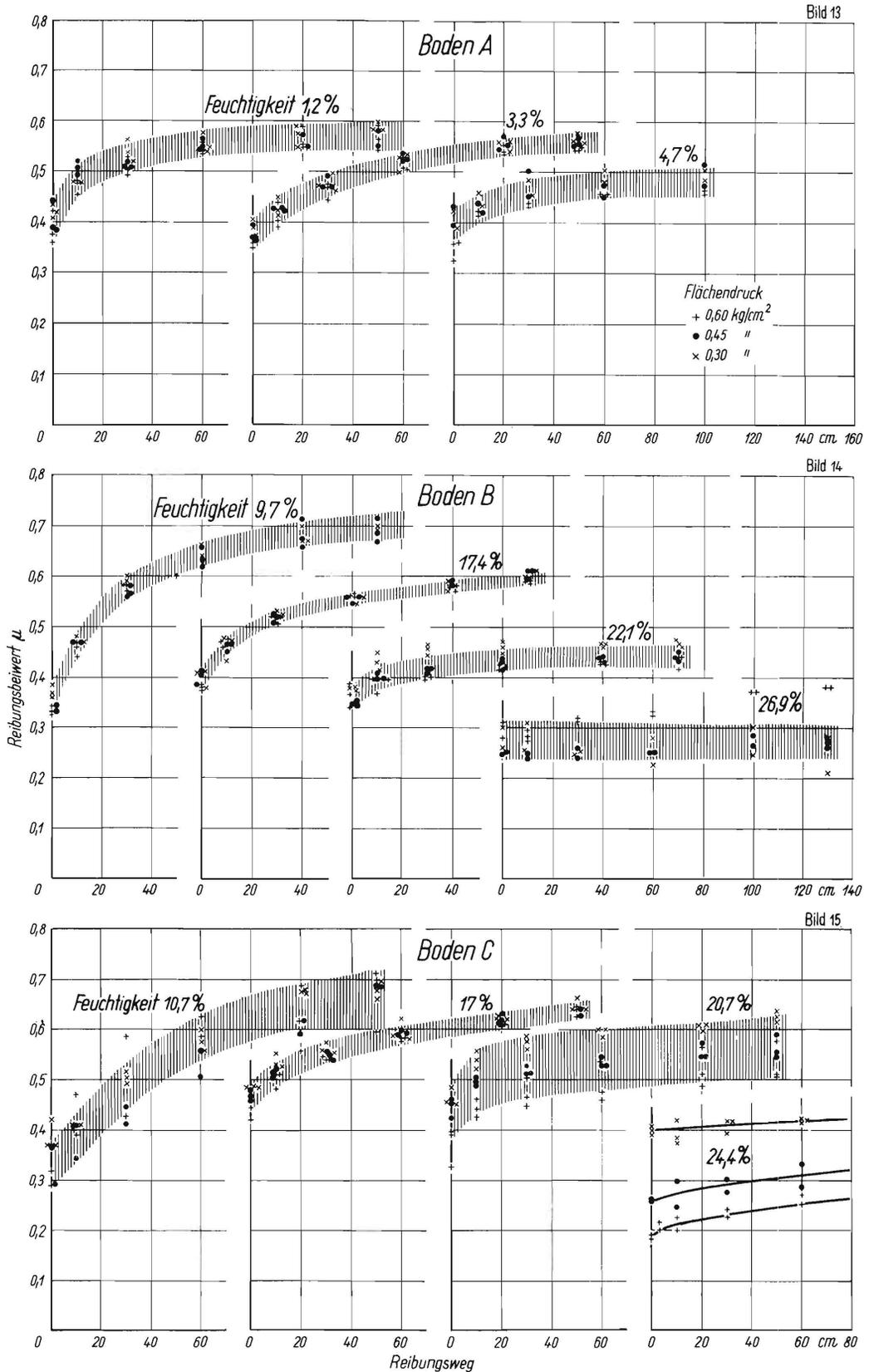


Bild 13 bis 15. Reibungsbeiwerte für Stahl auf Boden A, B und C in Abhängigkeit vom Reibungsweg für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte.

Boden A: Sand, Boden B: feinsandiger Lehm, Boden C: lehmiger Ton (Bodenanalysen s. Zahlentafel I)

Reibungsweg für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte dargestellt. Beim Sand A nimmt der Reibungsbeiwert von 0,4 je nach Feuchtigkeitsgehalt auf 0,5 bis beinahe 0,6 zu (Bild 13). Beim feinsandigen

Lehm B ist dieser Anstieg noch viel ausgeprägter. Der Reibungsbeiwert wächst bei trockenem Boden mit 9,7% Feuchtigkeit von 0,35 auf 0,7, also auf das Doppelte und bei einer Feuchtigkeit von 17% von

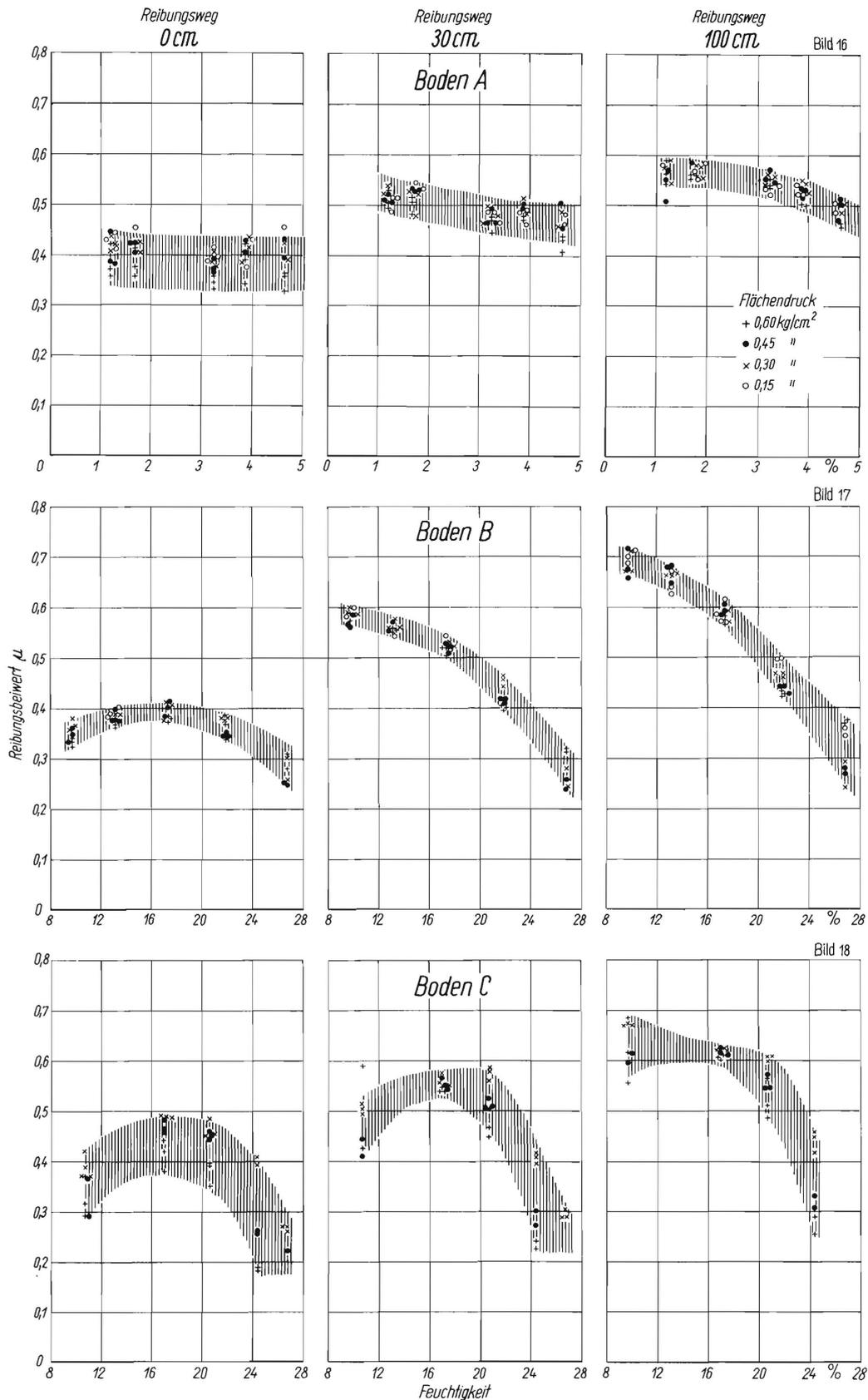


Bild 16 bis 18. Reibungsbeiwerte für Stahl auf Boden A, B und C in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt für drei verschiedene Reibungswege.

0,4 auf 0,6, also um 50% an (Bild 14). Mit grösserer Feuchtigkeit nimmt μ mit dem Reibungsweg immer weniger zu und bei nassem Boden mit 20,9% Feuchtigkeit bleibt der Reibungsbeiwert mit $\mu =$ etwa 0,28

angenähert konstant. Beim lehmigen Ton C mit Muschelkalk wächst der Beiwert bei 10,7% Feuchtigkeit von 0,35 auf 0,67, bei 20,7% Feuchtigkeit von 0,45 auf 0,55 (Bild 15) an.

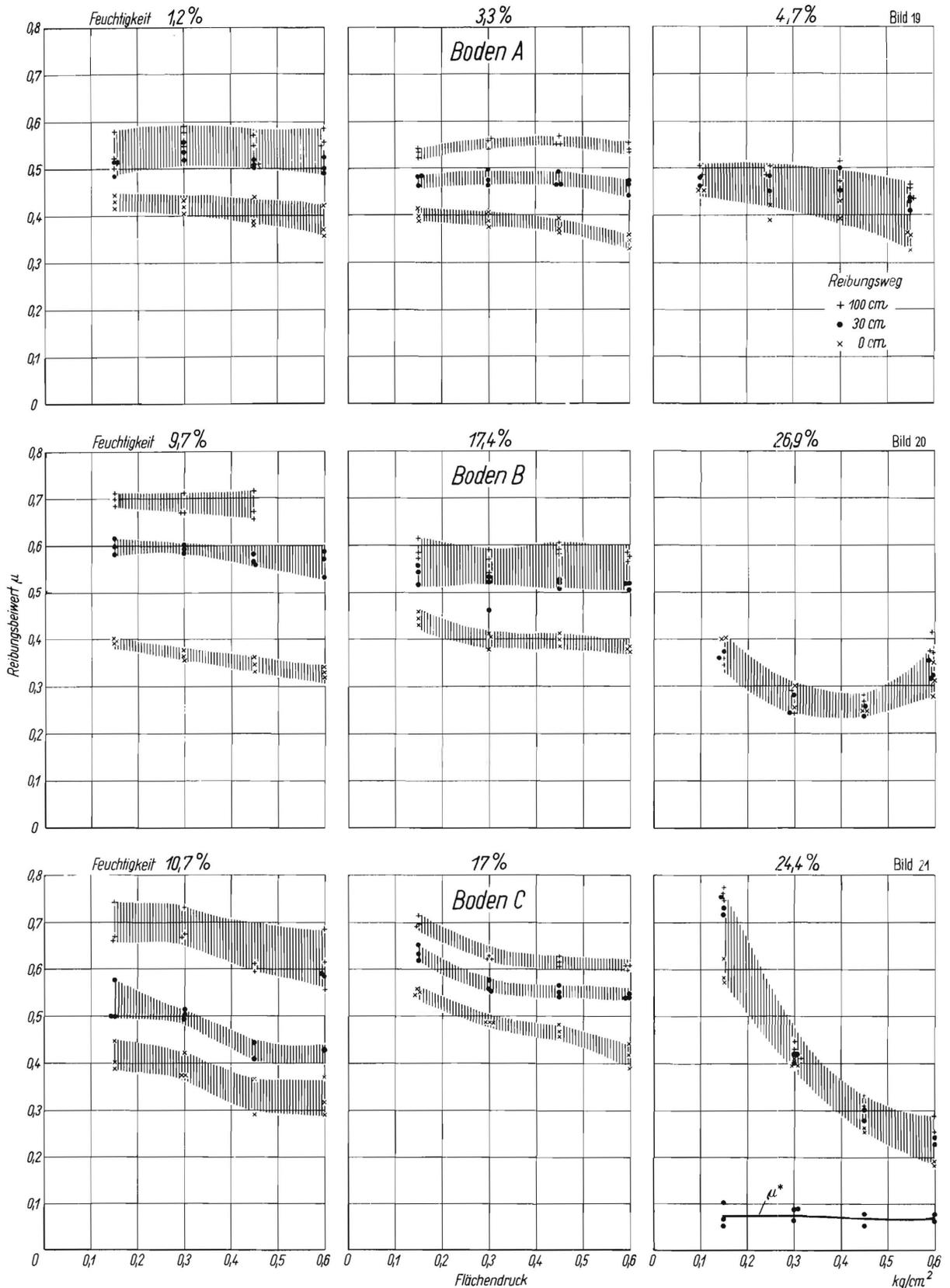


Bild 19 bis 21. Reibungsbeiwerte für Stahl auf Boden A, B und C in Abhängigkeit von dem Flächendruck für verschiedene Feuchtigkeiten.

In Bild 16 bis 18 ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf den Reibungsbeiwert nach Zurücklegen eines Reibungsweges von 0, 30 und 100 cm dargestellt. Der Sand A kann wenig Feuchtigkeit aufneh-

men, und daher sind seine Gewichtsprozentage an Wasser gering. Bei dem Reibungsweg 0 ist der Reibungsbeiwert über der Feuchtigkeit für den Boden A annähernd konstant. Bei den Reibungswegen 30 und noch mehr

bei 100 cm ergibt sich eine Abnahme des Reibungsbeiwertes mit zunehmender Feuchtigkeit. Bei dem feinsandigen Lehm *B* wirkt sich die Feuchtigkeit erheblich stärker aus, besonders bei grösserem Reibungsweg. Beim Reibungsweg 100 nimmt der Beiwert von 0,7 bei 9,7% Feuchtigkeit auf 0,3 bei 26,9% Feuchtigkeit ab. Der lehmige Ton *C* schliesslich hat bei 18% Feuchtigkeit ein Maximum des Reibungsbeiwertes.

Bei den Bildern 13 und 18 sind die Messungen für verschiedene Normaldrücke aufgetragen. Dadurch ergeben sich z.T. grössere Streuungen für μ , als es bei einem einzigen Druck der Fall wäre. Um zu überprüfen, wie weit das *Coulombsche* Gesetz, nach dem der Reibungsbeiwert unabhängig von der Normalkraft ist, für den Fall Stahl auf Boden wirklich gilt, wurde in Bild 19 bis 21 der Reibungsbeiwert in Abhängigkeit vom Normaldruck aufgetragen. Die Reibfläche *F* des Stahl- bzw. Gummirings beträgt 100 cm². Bei den untersuchten Lasten von 60, 45, 30 und 15 kg betragen also die Normaldrücke 0,60; 0,45; 0,30 und 0,15 kg/cm². Bei Sand *A* ist der Reibungsbeiwert angenähert unabhängig von der Last, lediglich bei grösserer Feuchtigkeit nimmt er mit zunehmender Last etwas ab. Bei feinsandigem Lehm *B* ist er ebenfalls angenähert unabhängig von der Last. Nur bei grosser Feuchtigkeit nimmt auch er zu einem Minimum bei 0,4 kg/cm² ab, steigt aber dann wieder an; das mag damit zusammenhängen, dass bei höherer Last das Wasser herausgepresst wird und nicht mehr als Schmiermittel wirken kann. Bei lehmigem Ton *C* nimmt bei allen Feuchtig-

keiten der Reibungsbeiwert mit zunehmendem Flächendruck ab. Bei diesem Boden überlagert sich der reinen Reibung eine der Reibungsflächen proportionale, aber von der Last unabhängige Adhäsion, die sich bei kleinen Flächendrücken mehr auf den Reibungsbeiwert auswirkt als bei grossen. Man kann für diesen Boden im nassen Zustand folgendes Gesetz für die Reibungskraft annehmen

$$R = \mu^* N + a \cdot F = \mu \cdot N \quad (1)$$

Unter Annahme eines Adhäsionswertes von $a=0,1 \text{ kg/cm}^2$ bleibt bei 24,4% Feuchtigkeit und 30 cm Reibungsweg der reine Reibungsbeiwert μ^* angenähert konstant und ist nur noch sehr gering.

Um den Einfluss der Oberflächengüte des Stahls auf den Reibungsbeiwert zu ermitteln, wurde in Parallelversuchen ein feingeschlichteter mit einem geschliffenen Stahlring verglichen. Bild 22 zeigt die Oberfläche des feingeschlichteten, vergüteten Stahlrings (Vickershärte $HV = 550 \text{ kg/cm}^2$), Bild 23 die des geschliffenen und gehärteten Stahlrings ($HV=900 \text{ kg/cm}^2$) bei 10-facher Vergrösserung. Nach Bild 24 waren beim Reibungsweg 0 die Beiwerte ungefähr gleich, mit zunehmendem Reibungsweg ergaben sich bei dem geschliffenen Ring etwas höhere Beiwerte; lediglich bei nassem Boden unterschieden sich die Beiwerte auch bei grösseren Reibungswegen nicht. Vermutlich liegt der Grund für die höheren Beiwerte bei dem geschliffenen Ring darin, dass die von der Schleifbearbeitung herrührenden



Bild 22. Oberfläche eines feingeschlichteten Stahlringes bei 10-facher Vergrösserung (die Reibriefen verlaufen genau in derselben Richtung wie die Drehriefen).

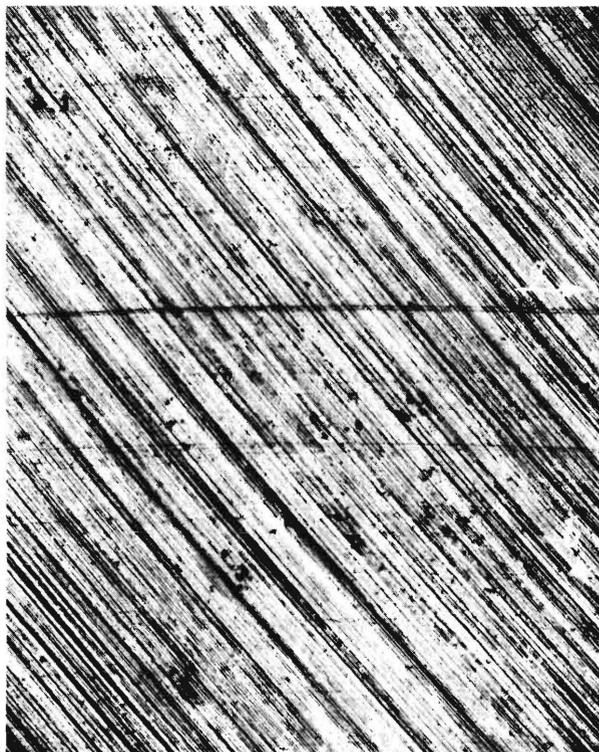


Bild 23. Oberfläche eines geschliffenen Stahlringes (die Reibriefen *a* laufen in anderer Richtung wie die von der Schleifbearbeitung herrührenden Riefen *b*).

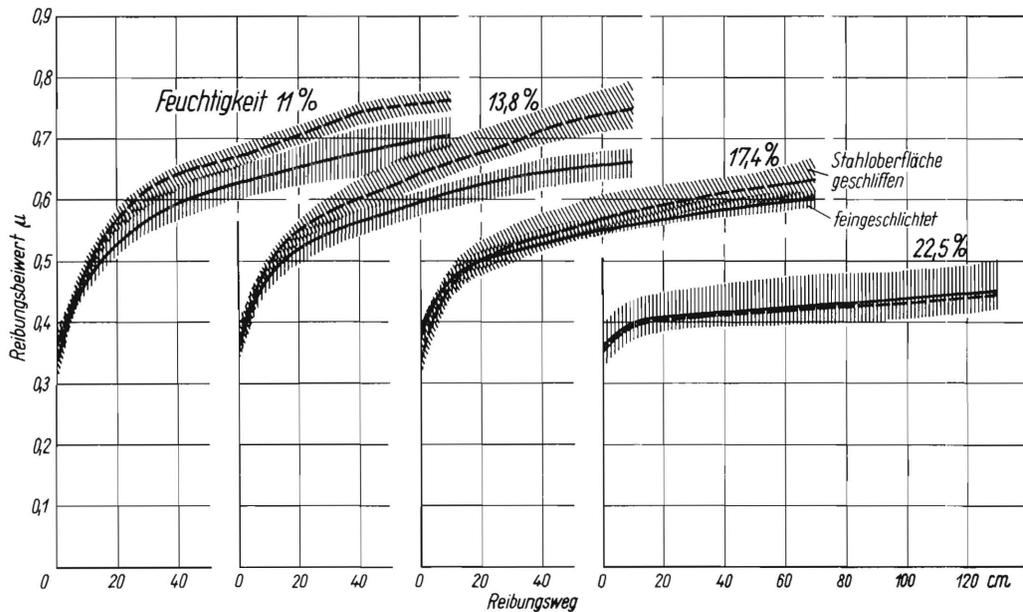


Bild 24. Reibungsbeiwerte für Stahl mit zwei verschiedenen Oberflächengüten auf feinsandigem Lehm B in Abhängigkeit von dem Reibungsweg für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte.

Riefen nicht mit der Bewegungsrichtung des Ringes auf dem Boden übereinstimmen.

Will man die mit dem Reibring gewonnenen Ergebnisse auf eine über den Boden gleitende Schiene mit der Länge l übertragen, so hat man am Schienenanfang immer den Reibungsweg 0 und den Reibungsbeiwert μ_0 , am Schienenende (wenn die Schiene mindestens einen Gesamtweg l zurückgelegt hat) den Reibungsweg l und den Beiwert μ_l . Ist der Flächen- druck der Schiene von vorn nach hinten gleich, so kann man mit guter Näherung mit dem Wert $\mu_{0,4 \cdot l}$, der bei 40% der Schienenlänge vorhanden ist, als mittleren Reibungsbeiwert rechnen.

Ändert sich jedoch auch der Flächen- druck eines gleitenden Körpers, so ist die Reibungskraft

$$R \approx \sum \mu_l \cdot p \cdot \Delta F$$

und der mittlere Reibungsbeiwert

$$\mu_{\text{mittel}} = (\sum \mu_l \cdot p \cdot \Delta F) / N$$

Man zerlegt die Gleitfläche in einzelne Flächenelemente ΔF und bestimmt den jeweiligen Reibungsweg und zugehörigen Reibungsbeiwert sowie den Flächen- druck dieser Elemente und summiert dann die Teil- reibungskräfte. Überträgt man die Ergebnisse der Reibungsversuche auf einen Pflugkörper, so muss man z.B. bei Boden B und einer Feuchtigkeits- gehalt von 17 Gew.% an der Schar- schneide mit einem Beiwert von 0,4, am Ende des Streichblechs dagegen mit einem Beiwert von 0,6 rechnen. Andererseits ist der Normaldruck an der Schar- schneide am höchsten und nimmt dann schnell ab; am Streichblechende ist er annähernd Null. Der hohe Reibungsbeiwert, verbunden mit geringem Normaldruck, ist ein Grund dafür, dass am Streichblechende gern der Boden haften bleibt. Dies wird noch begünstigt, wenn sich dort

eine dünne Rostschicht gebildet hat. Bei dem lehmigen Tonboden C nimmt der Reibungsbeiwert mit abnehmendem Flächen- druck zu. Da am Streichblechende der Flächen- druck sehr gering ist, kann man bei diesem Boden die Reibung oder besser die Adhäsion verringern, wenn man das Streichblech in der in Bild 25 gezeigten Weise ausspart. Auf die konstruktiven Nachteile dieser Ausführung soll hier nicht eingegangen werden.

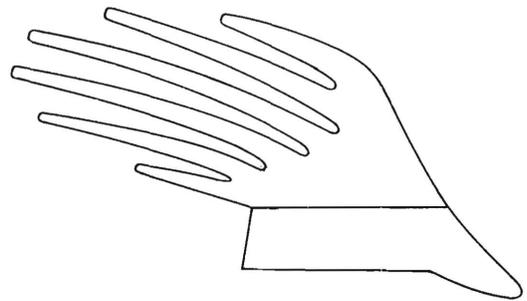


Bild 25. Streichblech mit Ausschnitten zur Verringerung der Adhäsion zur Bearbeitung feuchter, toniger Böden.

Reibung Stahl auf Boden bei anderen Autoren

Ein Vergleich dieser mit Hilfe eines Reibringes gemessenen Werte mit denen anderer Autoren ist nicht ohne weiteres möglich, weil die Versuchsmethoden nicht die gleichen waren. Im allgemeinen wird zur Bestimmung des Reibungsbeiwertes μ eine belastete Platte über den Boden gezogen und die Reibungskräfte gemessen, oder es wird die zu untersuchende Bodenprobe soweit geneigt, bis ein Gleitkörper sich auf der schiefen Bodenebene in Bewegung setzt. Dabei ist der Tangens des Neigungswinkels gleich μ . Aus diesen Versuchen geht also der Einfluss des Reibungsweges nicht hervor.

Schachbasian [2] beobachtete, dass der Reibungsbeiwert bei feuchtem Boden höher war als bei trockenem Boden (Zahlentafel 2).

Zahlentafel 2

Reibungsbeiwerte auf verschiedenen Böden nach Schachbasian [2]

	Kalksand	Lehm Einzelkornstruktur	Lehm Krümelstruktur	Humus	Kaolin
trockener Boden $\mu =$	0,38	0,47	0,36	0,39	0,33
feuchter Boden $\mu =$	0,63	0,53	0,47	0,65	0,43

Dinglinger [3] stellte fest, dass die Reibungsbeiwerte für Stahl auf Sand mit zunehmender Feuchtigkeit anwachsen, bei sehr nassem Sand aber wieder abnehmen (Zahlentafel 3). Ausserdem beobachtete er, wie auch Schachbasian, dass bei grobkörnigem Sand die Reibungsbeiwerte niedriger waren als bei feinkörnigem Sand.

Zahlentafel 3

Reibungsbeiwerte für Stahl auf Sand nach Dinglinger [3]

	staubtrocken	lufttrocken	angefeuchtet	nass	völlig nass
$\mu_s =$	0,462	0,53	0,55	0,60	0,50

M. Scotton und G. Jacopozzi [4] ermittelten bei drei verschiedenen Böden ebenfalls einen Anstieg der Reibungsbeiwerte mit zunehmender Feuchtigkeit bis zu einem Maximum und eine Abnahme von μ bei nassen Böden (Zahlentafel 4). Ausserdem beobachteten sie eine Abnahme der Reibungsbeiwerte mit zunehmendem Flächendruck. Diese Abnahme war bei nassem Boden besonders gross, während bei trockenem Boden μ annähernd konstant blieb.

Zahlentafel 4

Reibungsbeiwerte verschiedener Böden in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit nach M. Scotton und G. Jacopozzi [4]

Boden	Ton u. Schluff %	Kalk %	Reibungsbeiwert μ für Feuchtigkeit			
			5 %	15 %	20 %	25 %
A	74	14,8	0,47	0,8	0,87	0,68
B	65	15,9	0,4	0,7	0,79	0,61
C	49	5,0	0,39	0,57	0,63	0,54

M.L. Nichols [5] untersuchte eine Reihe natürlicher Böden, sowie aus verschiedenen Mischungen von Sand und Cecil-Ton künstlich hergestellter Böden. Auf Grund seiner Ergebnisse unterscheidet er zwischen drei von der Bodenfeuchtigkeit abhängenden Phasen, in denen verschiedene Reibungsgesetzmässigkeiten herrschen.

1. Die reine Reibungsphase bei trockenem Boden. Hierin ist der Reibungsbeiwert μ unabhängig von der Grösse der Berührungsfläche, vom Flächen-

druck und der Gleitgeschwindigkeit. Dagegen ändert er sich mit dem Werkstoff des Gleitkörpers und dessen Oberflächenbeschaffenheit. Im ganzen ist μ relativ klein. Es steigt mit dem Kolloidgehalt etwa von 0,3 bei 4% Kolloidgehalt auf 0,5 bei 32% Kolloidgehalt.

2. Die Adhäsionsphase bei normaler Ackerfeuchtigkeit. Hierin ändert sich μ mit der Geschwindigkeit, der Grösse der Berührungsfläche, dem Flächendruck, dem Werkstoff des Gleitkörpers und dessen Oberflächenbeschaffenheit. Den grössten Einfluss auf μ hat aber in dieser Phase die Oberflächenspannung des Feuchtigkeitsfilmes, der die einzelnen Bodenpartikel umschliesst und mit dem der Stahl in Berührung gerät. Mit zunehmender Feuchtigkeit wird die Fläche, in der der Feuchtigkeitsfilm Stahl und Boden verbindet, immer grösser. Beim Gleiten müssen aber die Oberflächenspannungen in diesem Film überwunden werden, was zu einem starken Anwachsen des Reibungswiderstandes führt²⁾. Die Oberflächenspannungen hängen vor allem vom Wassergehalt, sowie vom Ton- und Kolloidgehalt des Bodens, im geringen Masse auch von der Temperatur und von Viskositätsänderungen durch in der Flüssigkeit gelöste Salze ab.

3. Die Schmierphase bei nassem Boden. Wenn der Feuchtigkeitsgehalt gross genug wird, kann sich schliesslich eine Schmierwirkung des Wassers ergeben, während die Oberflächenspannungen wieder sehr klein werden und der Reibungsbeiwert abnimmt. In der Schmierphase hängt der Reibungsbeiwert vom Wassergehalt, vom Flächendruck, von der Geschwindigkeit, vom Werkstoff des Gleitkörpers und seiner Oberflächenbeschaffenheit ab.

2) Die mit zunehmendem Reibungsweg enger werdende Verbindung zwischen Stahl und Boden durch den Feuchtigkeitsfilm und das Anwachsen der Oberflächenkräfte sind auch die Ursache des vom Verfasser beobachteten Anstiegs von μ mit dem Reibungsweg.

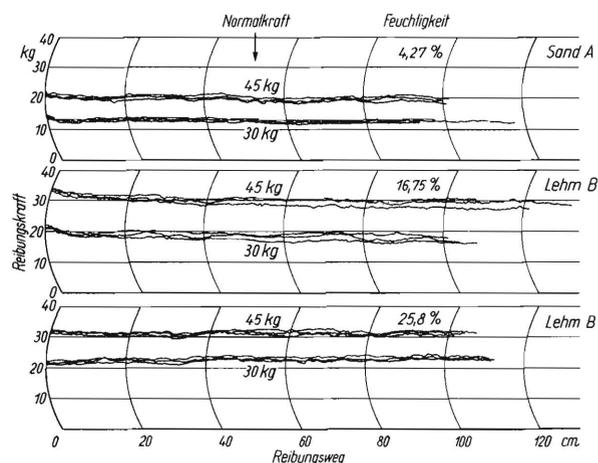
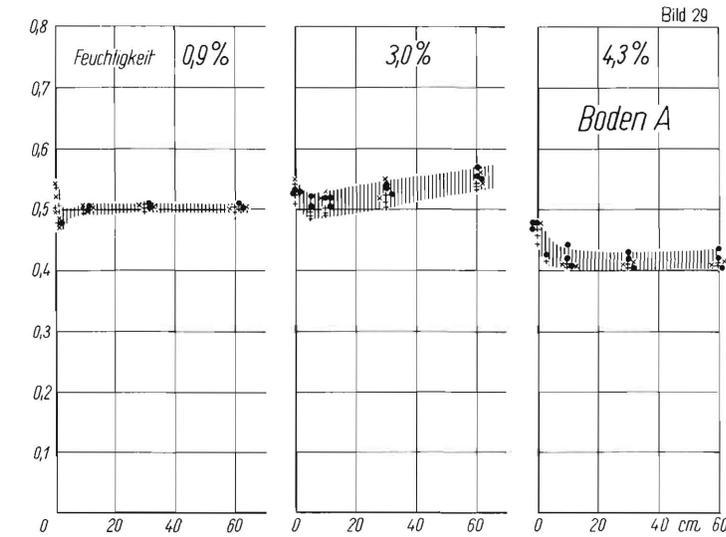


Bild 26 bis 28. Reibungsdiagramme von Gummi auf Boden A und B bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten.



Schliesslich ergibt sich noch eine zusätzliche Erhöhung der Reibung, wenn der Boden infolge des Flächendruckes des Gleitkörpers noch zusammengedrückt wird oder wenn er sich plastisch verformt. Das ist vor allem in der Schmierphase bei grosser Feuchtigkeit der Fall, in der der Boden sich am leichtesten zusammendrücken lässt und plastisch fliesst; es kann aber auch bei trockenem Sand vorkommen.

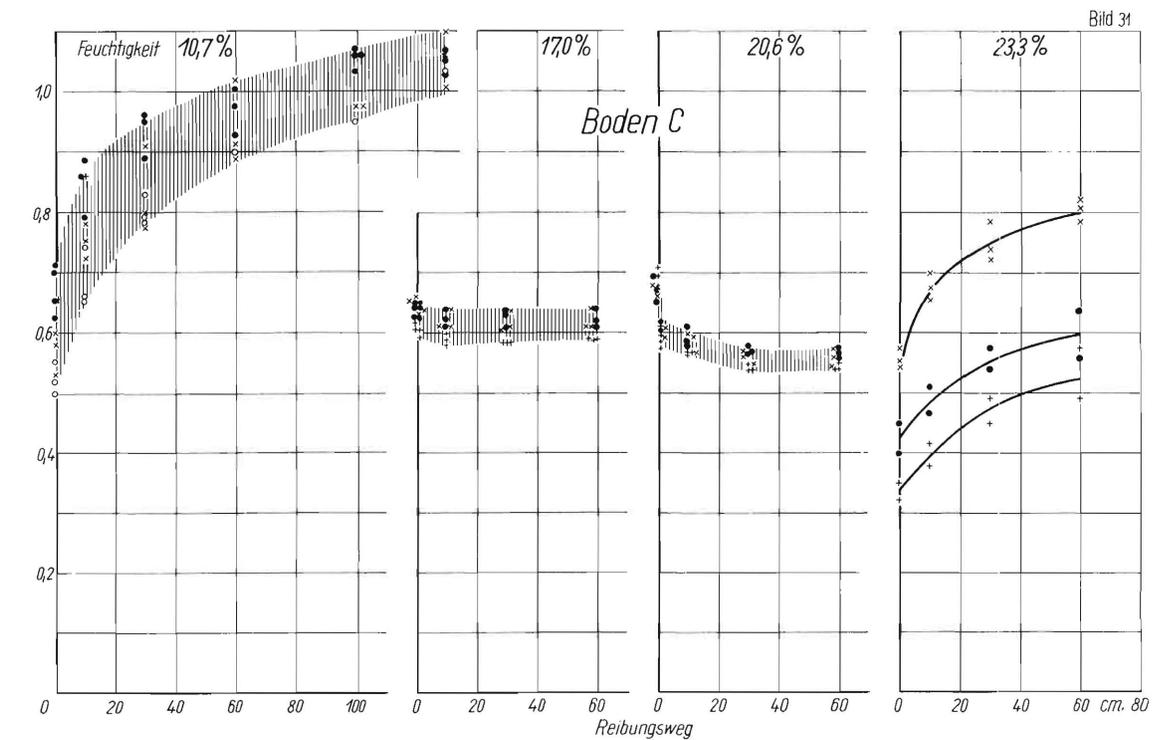
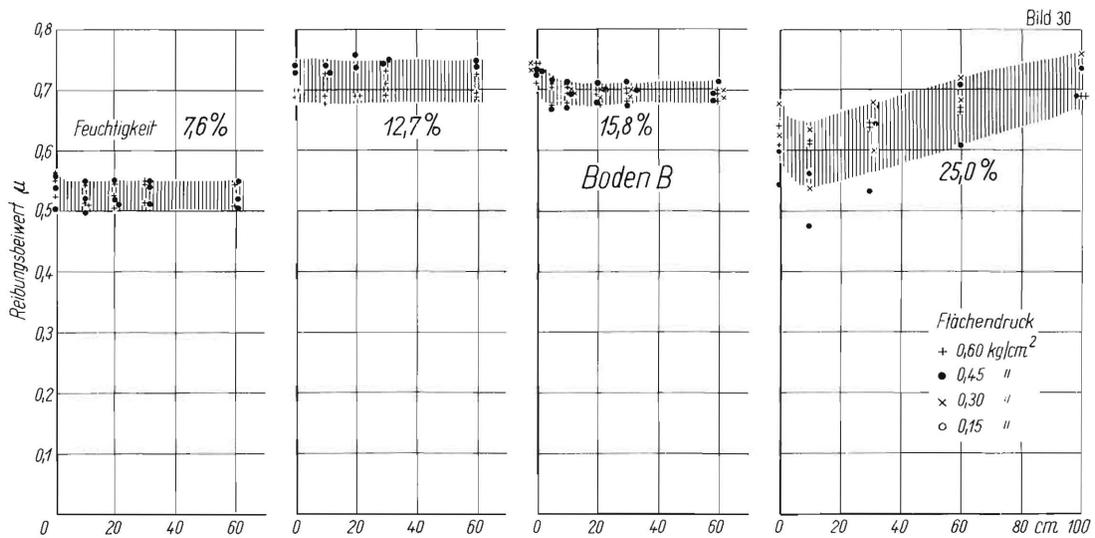


Bild 29 bis 31. Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden A, B und C in Abhängigkeit vom Reibungsweg für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte.

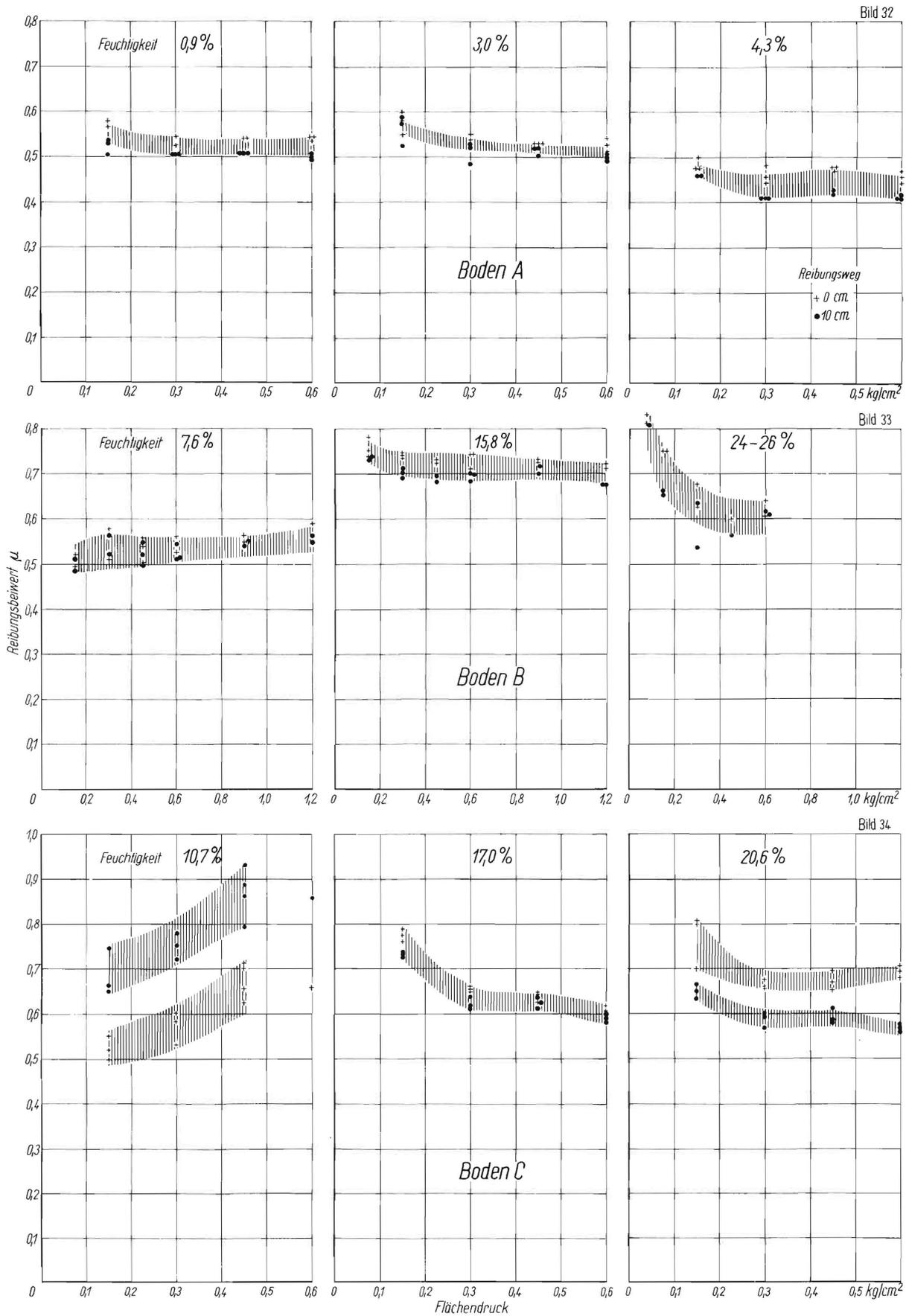
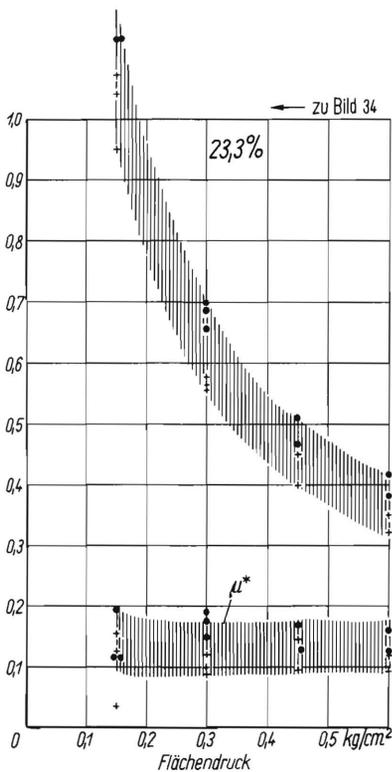


Bild 32 bis 34. Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden A, B und C in Abhängigkeit von dem Flächendruck für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte.

Reibung Gummi auf Boden

In gleicher Weise wie die Reibungsbeiwerte für Stahl auf Boden bestimmt worden waren, wurden auch die Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden ermittelt. Dabei wurde ein Stahlring benutzt, auf den eine 12 mm starke Gummischicht einer Zusammensetzung, wie sie für die Stollen der Schlepperreifenprofile verwendet wird, aufvulkanisiert worden war.

Bild 26 bis 28 zeigen einige Reibungsdiagramme von Gummi auf Boden und in Bild 29 bis 31 sind die Reibungsbeiwerte für Gummi auf verschiedenen Böden mit verschiedener Feuchtigkeit in Abhängigkeit vom Reibungsweg dargestellt. Im Gegensatz zur Reibung Stahl auf Boden ändert sich hierbei der Reibungsbeiwert nicht wesentlich mit dem Reibungsweg, mit Ausnahme des lehmigen Tons C im sehr trockenen und im nassen Zustand. Nur bei Beginn der Gleitbewegung ergeben sich geringfügig höhere Werte. Das wird vermutlich dadurch verursacht, dass sich der Gummi bei Belastung in die Bodenunebenheiten einpresst, bis nach Einsetzen der Gleitbewegung eine Glättung der Bodenoberfläche eingetreten ist. Dann stellt sich ein annähernd konstanter Reibungsbeiwert ein. In Bild 32 bis 34 sind die Reibungsbeiwerte für Gummi auf den untersuchten Böden in Abhängigkeit vom Flächendruck wiedergegeben. Bei Sand A und feinsandigem Lehm B sind sie ziemlich konstant, lediglich beim nassen Lehm wirkt sich ein Adhäsionsanteil aus.



Zu Bild 34. Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden C für 23,3% Feuchtigkeit.
(s. vorhergehende Seite unten)

Bei dem lehmigen Ton C (Bild 34) nimmt ähnlich wie bei der Reibung mit dem Stahlring auch mit dem Gummiring der Reibungsbeiwert mit zunehmendem

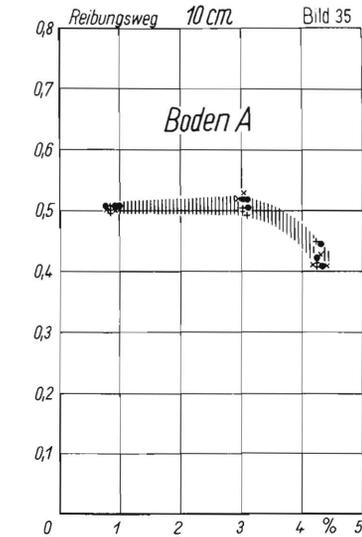
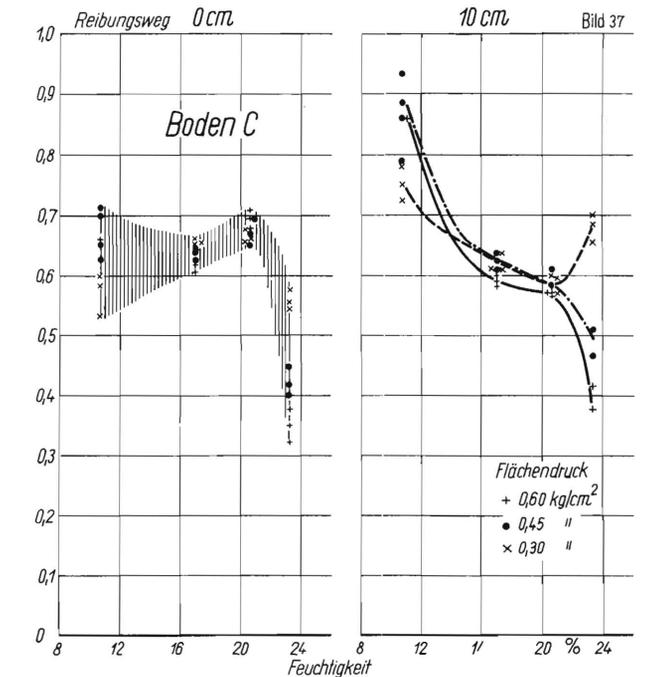
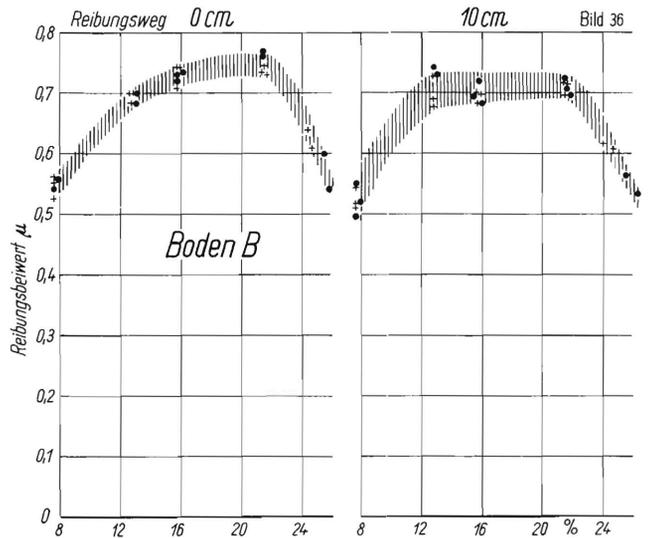


Bild 35 bis 37. Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden A, B und C in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit für verschiedene Reibungswege.



Flächendruck (mit einer Ausnahme bei 10,7% Feuchtigkeit) ab. Das ist besonders bei nassem Ton der Fall. Hierbei ist also der Adhäsionsanteil wieder sehr gross. Rechnet man nach Gleichung (1) Adhäsion und reine Reibung μ^* aus, so ergibt sich bei 0 cm Reibungsweg eine Adhäsion von 0,14 kg/cm² und ein Reibungsbeiwert $\mu_0^* \approx 0,1$ und bei 10 cm Reibungsweg eine Adhäsion von 0,15 und ein Reibungsbeiwert $\mu_{10}^* \approx 0,15$.

Bild 35 bis 37 zeigen schliesslich die Reibungsbeiwerte für Gummi auf Boden in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit. Bei Sand A sind die Werte im Bereich normaler Feuchtigkeit etwa gleich und nehmen dann mit höherer Feuchtigkeit ab. Bei feinsandigem Lehm B steigt der Reibungsbeiwert vom trockenen Boden bis zur normalen Ackerfeuchtigkeit an. Im Bereich der normalen Ackerfeuchtigkeit (10 bis 21%) bleibt der Wert angenähert konstant und ist mit 0,7 recht hoch. Lediglich bei nassem Boden nimmt der Wert wieder ab. Bei lehmigem Ton C ergibt sich ein sehr unübersichtliches Bild. Im Bereich normaler Ackerfeuchtigkeit (14 – 21%) beträgt der Beiwert etwa 0,6. Bei nassem Boden nimmt er mit höherem Flächendruck stark ab, während bei geringerem Flächendruck (0,3 kg/cm²) die Adhäsion diese Abnahme überdeckt.

Reibung Boden auf Boden und Kohäsion im Boden

Mit Hilfe eines Scherrings (Bild 2) kann ferner mit demselben Gerät die Reibung Boden auf Boden und die Kohäsion im Boden gemessen werden. In Ergänzung zu einem früheren Bericht [1] werden noch folgende Ergebnisse mitgeteilt. In Bild 38 bis 41 werden einige Abscherdiagramme verschiedener Proben des feinsandigen Lehms B mit annähernd gleicher Feuchtigkeit, aber unterschiedlicher Dichte gezeigt. Der Porenanteil betrug 35%, 40%, 45% und 50%. Es handelte sich dabei nicht um natürlich ge-

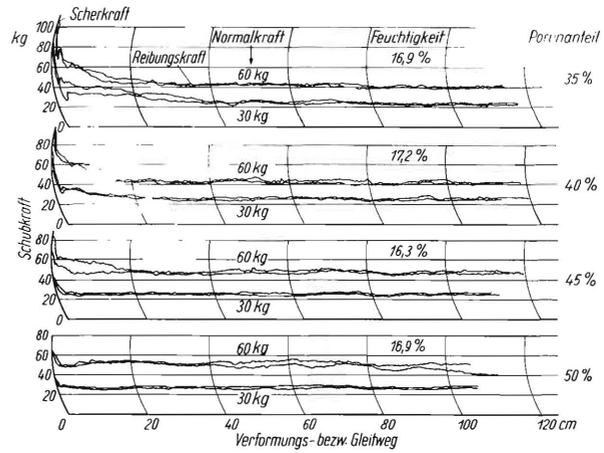


Bild 38 bis 41. Abscherdiagramme von feinsandigem Lehm B mit verschiedener Dichte.

lagerten Boden, sondern um Bodenproben, die unter einer hydraulischen Presse bis zu den gewünschten Werten verdichtet worden waren. Die Schubspannung steigt zunächst im Bereich der elastischen und plastischen Verformung über dem Verformungsweg steil bis zu einem Maximum an, bei dem der Abschervorgang beginnt. Dann fällt die Schubspannung mit Überwindung der Kohäsion allmählich ab, um im Gebiet des reinen Gleitens Boden auf Boden annähernd konstante und bei den verschiedenen Proben gleiche Werte anzunehmen. Die Differenz zwischen Abscherspannung τ_B (= Scherkraft/Scherfläche) und Reibungsschubspannung τ_S (= Reibungskraft/Scherfläche) ist gleich der Kohäsion c im Boden. Die Scherspannung und damit die Kohäsion ist umso grösser, je dichter der Boden gelagert ist. In Bild 42 sind die Scher- und Reibungsspannungen über der Normalspannung aufgetragen. Die unteren Kurven τ_S geben die reinen Reibungsspannungen wieder, wie sie nach erfolgtem Abscheren gemessen wurden. Sie sind angenähert proportional den Normalspannungen, gehorchen also dem Coulombschen Reibungsgesetz; die oberen Kurven geben die maxi-

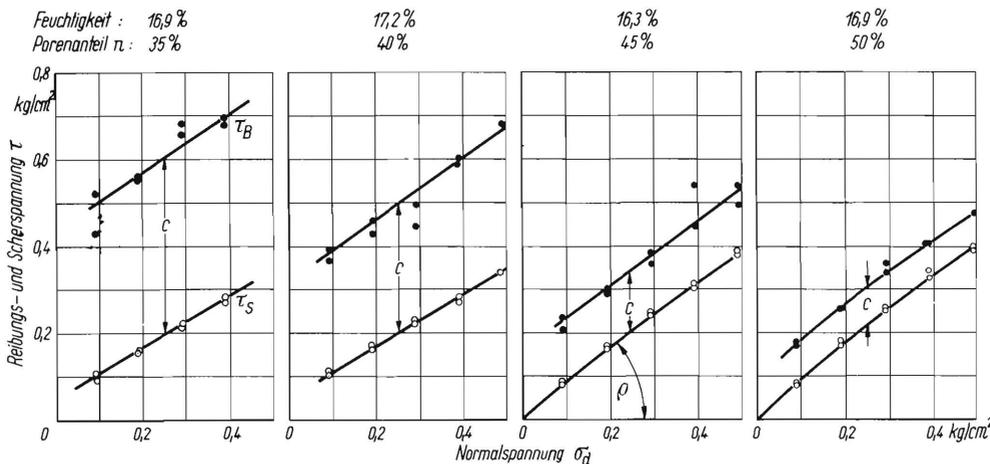


Bild 42. Scherspannung τ_B und Reibungsspannung τ_S in Abhängigkeit von der Normalspannung und Grösse der Kohäsion c bei verschiedener Dichte des Bodens B.
Reibungsbeiwert $\mu = \operatorname{tg} \rho$

malen Abscherspannungen wieder. Damit ergeben sich die Gleichungen für

die Reibungsschubspannung $\tau_S = \mu \cdot \sigma_d$
 und die Reibungskraft $T_S = \mu \cdot N$
 sowie die max. Scherspannung $\tau_B = c + \tau_S = c + \mu \sigma_d$
 und die Scherkraft $T_B = c F + \mu \cdot N$

Die Kohäsion c für den feinsandigen Lehm B bei einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 17% beträgt:

Porenanteil n	%	35	40	45	50
Kohäsion c	kg/cm ²	0,42	0,30	0,14	0,09

Die Kohäsionswerte bei natürlich gelagertem Boden werden im allgemeinen etwas höher sein als die bei künstlich verdichtetem Boden gleichen Porenanteiles. Bei trockenem Boden mit weniger als 10% Feuchtigkeit sind die Werte des natürlich gelagerten Bodens erheblich höher, sodass man hier mit künstlich verdichteten Bodenproben nicht mehr viel anfangen kann.

In Bild 43 sind die Reibungsbeiwerte Sand auf Sand A und Lehm auf Lehm B in Abhängigkeit von dem Flächendruck und in Bild 44 in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit wiedergegeben. Während bei

Sand die Beiwerte angenähert konstant gleich 0,6–0,7 sind, nehmen sie bei Lehm mit zunehmender Flächenpressung ab und mit zunehmender Feuchtigkeit zu.

In Bild 45 sind schliesslich die Reibungsbeiwerte von Stahl, Gummi und Boden auf Boden in Abhängigkeit vom Reibungsweg einander gegenübergestellt. Daraus ergibt sich, dass zwar bei kleinem Reibungsweg der Reibungsbeiwert von Stahl erheblich geringer ist als der von Gummi, z.B. ist bei Boden B

$$\mu_0 \text{ Stahl} = 0,4 \quad \mu_0 \text{ Gummi} = 0,73$$

mit zunehmendem Reibungsweg wächst aber der Beiwert von Stahl erheblich an, während der Beiwert von Gummi geringfügig abnimmt. Z.B. ist bei Boden B

$$\mu_{100} \text{ Stahl} = 0,58 \quad \mu_{100} \text{ Gummi} = 0,65.$$

Der Reibungsbeiwert Boden auf Boden ist unabhängig vom Reibungsweg und beträgt bei Boden B i.M. etwa $\mu = 0,88$.

Bestimmung der Kohäsion und inneren Bodenreibung im Grundbau

Die Reibungsbeiwerte Boden auf Boden, sowie die Kohäsion im Boden sind für die Bodenmechanik des Grundbaues zwei der wichtigsten Kenngrössen. Man hat daher eine Reihe von Verfahren und Geräten

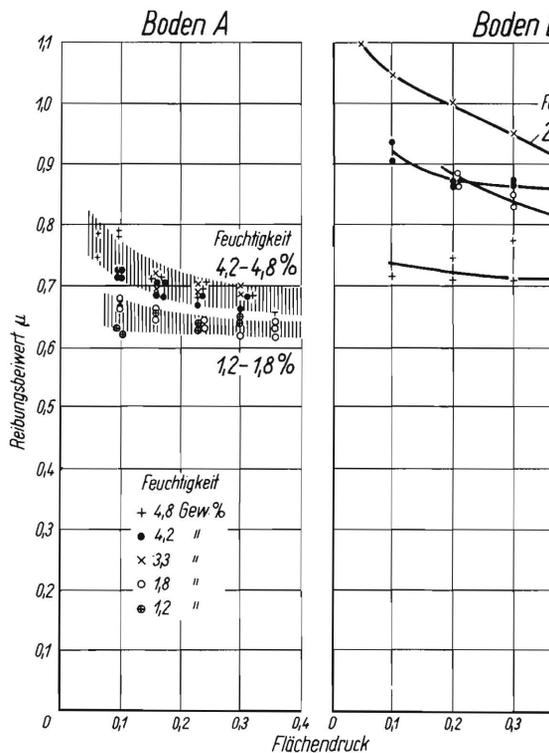


Bild 43. Reibungsbeiwerte Boden auf Boden in Abhängigkeit vom Flächendruck.

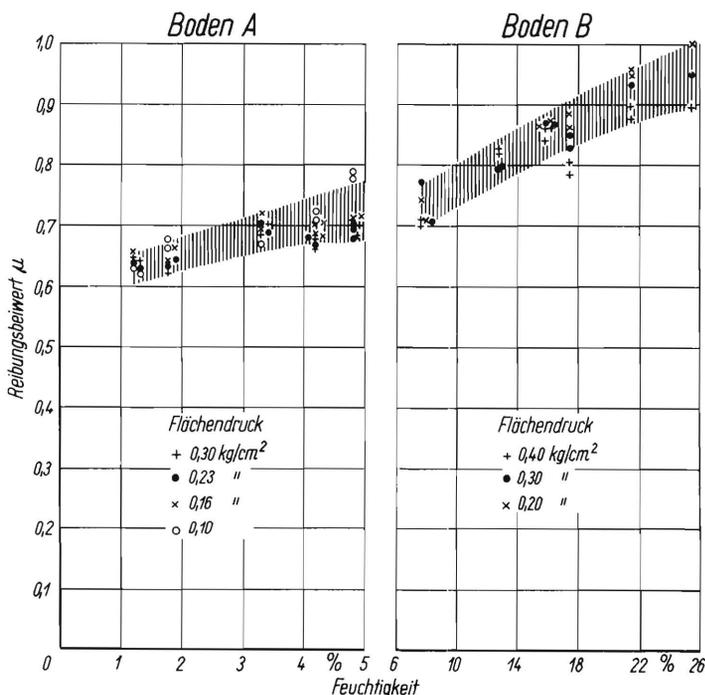


Bild 44. Reibungsbeiwerte Boden auf Boden in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit. →

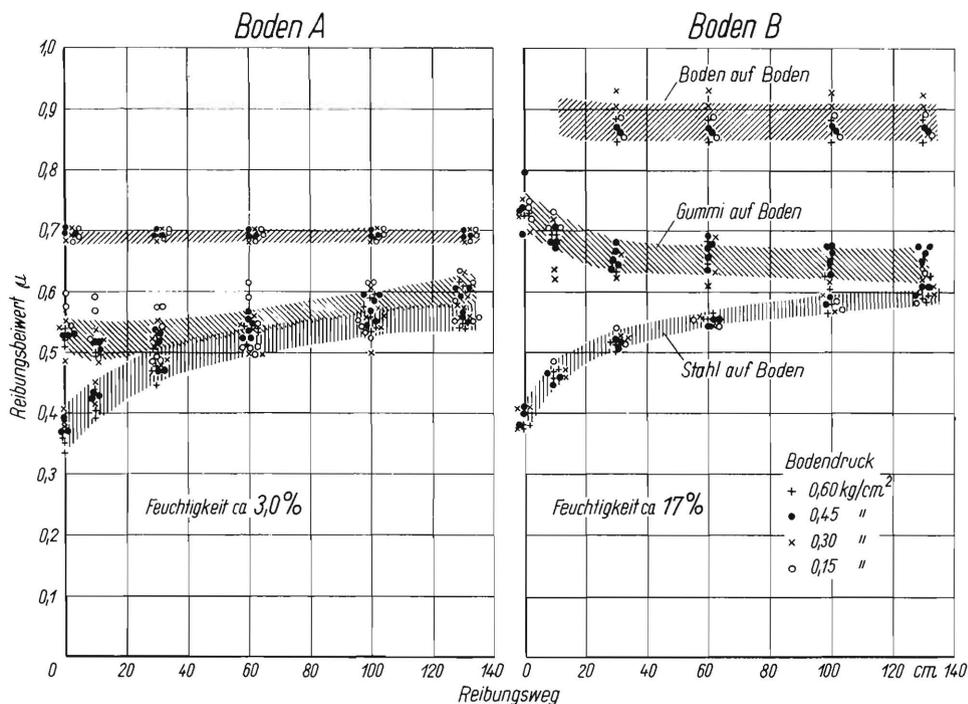


Bild 45. Vergleich der Reibungsbeiwerte für Stahl auf Boden, Gummi auf Boden und Boden auf Boden in Abhängigkeit vom Reibungsweg.

entwickelt, diese Werte zu bestimmen. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Versuchsdurchführung für die landtechnische Bodenmechanik besteht hierbei darin, dass man im allgemeinen keine im natürlichen Lagerungszustand entnommene Bodenproben, sondern mit viel Wasserzusatz künstlich vorbereitete Proben verwendet. Nach Aufbringen der Normallast muss man dann solange warten bis sich ein Porenvolumen eingestellt hat, das der Normallast entspricht und bei dem alles überschüssige Wasser herausgedrückt ist. Solange noch ein Porenwasserüberdruck vorhanden ist, erhält man geringere Schubkräfte, da ein Teil der Normallast noch vom Porenwasser getragen wird. Damit das Wasser entweichen kann und gleichzeitig eine gute Kraftübertragung erzielt wird, benutzt man gezahnte Filtersteine oder senkrecht stehende Stahlschneiden zwischen schmalen Filtersteinen als Auflage und Unterlagen der Scherbuchsen. Die auf diese Weise gewonnenen Scherkräfte enthalten nicht den sehr beträchtlichen Anteil der „kapillaren Kohäsion“, die durch die Oberflächenspannungen des Wassers hervorgerufen wird. Weiterhin sind die bei sehr langsamer Zunahme der Schubkräfte gewonnenen Scherkräfte im allgemeinen kleiner als die bei plötzlicher Aufbringung der Schubkräfte gewonnenen Werte. In der landtechnischen Bodenmechanik muss man aber fast immer mit plötzlicher und gleichzeitiger Aufbringung der Normallast und Schubkraft rechnen (z.B. beim Vorgang des Pflügens oder beim Abscheren des Bodens durch die Stollen der Schlepperreifen). Ferner darf man die kapillare Kohäsion keineswegs vernachlässigen. Infolgedessen kann

man die in der Bodenmechanik des Grundbaues gewonnenen Werte nur in Einzelfällen und mit Vorbehalt übernehmen.

Bei dem älteren Scherapparat nach Krey [6] wird eine Bodenprobe mit einem Querschnitt von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ und etwa 2 cm Höhe in zwei Rahmen gelagert, von denen der untere durch einen gewichtsbelasteten Hebel verschoben werden kann. Auch die Normallast wird durch gewichtsbelastete Hebel aufgebracht. Der Hebel, der die Schubkraft überträgt, wird stufenweise belastet bis bei Erreichen der Scherkraft sich eine Gleitfläche im Boden ausbildet und damit der Bruch eintritt.

Bei dem Gerät nach Casagrande [7] wird ebenfalls eine Bodenprobe von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Querschnitt und 2 cm Höhe benutzt. Die Schubkraft wird von einem an einem Hebel hängenden Wasserbehälter, der langsam angefüllt wird, oder durch einen Druckzylinder oder mit Hilfe einer Spindel aufgebracht. Bei diesen Geräten kann man im allgemeinen nur die Scherkraft, nicht aber auch die etwas geringere Schubkraft beim Gleiten des Bodens auf dem Boden bestimmen. Ausserdem wird die Fläche, bei der Boden auf Boden gleitet, mit wachsender Verschiebung kleiner.

Will man grössere Verschiebungen und das Gleiten Boden auf Boden mit untersuchen, sind Kreis- oder Kreisringschergeräte wie das von Tiedemann [8] entwickelte Ringschergerät zu verwenden, bei dem ein Bodenkreisring durch Torsion abgesichert wird. Bei diesem Gerät wird die waagerechte Torsionskraft durch ein Seil eingeleitet, das über eine Seilscheibe läuft und mit Gewichten belastet wird.

Benützt man anstelle eines Kreisrings einen Kreisquerschnitt, so erhält man keine eindeutige Beziehung zwischen Verschiebungsweg und Schubkraft, da der Verschiebungsweg proportional dem Radius zunimmt. Weitere Literaturangaben über Versuchsmethoden und Ergebnisse siehe [9].

Bei lufttrockenem Sand und bei von Wasser überflutetem Sand ist der Böschungswinkel mit guter Genauigkeit gleich dem Reibungswinkel. Bei feuchtem Sand ergeben sich aber erhebliche Fehler durch die Kapillarkräfte des Wassers. Bei bindigem Boden ist der Böschungswinkel kein brauchbares Mass für den Reibungswinkel.

Zusammenfassung

Mit Hilfe eines neu entwickelten Ringschergerätes wurden die Reibungsbeiwerte für Stahl bzw. Gummi auf Boden, sowie die Kohäsion und die Reibung Boden auf Boden gemessen. Dabei ergab sich bei der Reibung zwischen Stahl und Boden ein Anwachsen der Beiwerte in Abhängigkeit vom Gleitweg. Diese Erscheinung wird in der Weise erklärt,

dass während des Gleitens von Stahl auf Boden eine Einebnung und Verschmierung der Oberfläche stattfindet, die in Verbindung mit der Feuchtigkeit zu einem engeren Kontakt zwischen Stahl und Boden führt. Im Gegensatz dazu ergaben sich bei der Reibung Gummi auf Boden bei Beginn der Bewegung geringfügig höhere Reibungskräfte. Die Reibungskräfte sind im allgemeinen proportional der Normallast, d.h. die Reibungsbeiwerte sind unabhängig von dem Flächendruck. Lediglich bei nassem, sandigem Lehm und besonders stark bei nassem, lehmigem Ton überlagert sich der reinen Reibung eine Adhäsion, die proportional der Grösse der Reibungsfläche und unabhängig von der Normallast ist.

Beim Übergang von trockenem Boden mit weniger als 10 % Feuchtigkeit zu Boden mit normaler Ackerfeuchtigkeit zwischen 10 und 20 Gew.% nehmen die Reibungsbeiwerte im allgemeinen zu, um beim Übergang zu nassem Boden wieder stark abzufallen. Schliesslich wurden noch einige Reibungsbeiwerte von Boden auf Boden und die Kohäsion eines Bodens in Abhängigkeit von seiner Dichte mitgeteilt.

Schrifttum

- [1] *Söhne, W.*: Die Kraftübertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden. In: Grundlg.d.Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 75/87.
- [2] *Schachbasian, J.*: Untersuchungen über die Adhäsion und Reibung der Bodenarten an Holz und Eisen. Forsch. Agrikulturphysik. Herausgeber: Dr. E. Wollny. Bd. XIII. (1890).
- [3] *Dinglinger, E.*: Über den Bodenwiderstand beim Graben (Baggern). Diss. T.H. Hannover 1928.
- [4] *Scotton, M. u. H. Jacopozzi*: La resistance de glissement du sol en fonction du taux d'humidité. Actes du IVème Congrès International de Génie Rural. Rom 1951.
- [5] *Nichols, M.L.*: The Dynamic Properties of Soil, II. Soil and Metal Friction. Agricult. Engng. August 1931, S. 321/324.
- [6] *Krey, H.*: Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes, 5. Auflage von J. Ehrenberg. Berlin 1936.
- [7] *Casagrande, A.*: Über die Scherfestigkeit von Böden. Schriftenreihe d. Strasse, Bd. 16. Berlin 1939. S. 32.
- [8] *Tiedemann, B.*: Über die Schubfestigkeit bindiger Böden. Bautechn. Bd. 15. (1937) S. 400.
- [9] *Schultze, E. und H. Muhs*: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Berlin 1950.

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, Bundesallee 50