

Landtechnische Forschung

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTL)
LANDMASCHINEN- UND ACKERSCHLEPPER-VEREINIGUNG (LAV) IM VDMA
MAX-EYTH-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER LANDTECHNIK (MEG)

Heft 4/1966

MÜNCHEN

16. JAHRGANG

György Komádi:

Bestimmung der physikalischen Bodenkennwerte auf Grund der Zusammenhänge zwischen Scherdiagramm und Zugkraftcharakteristik

Agrarwissenschaftliche Universität, Fakultät für Landtechnik, Gödöllő

Zur mathematischen Bestimmung der von geländegängigen Fahrzeugen entwickelten Zugkraft dient das experimentell aufgenommene Scherdiagramm des Bodens. Die zur Beschreibung des Scherdiagramms entwickelte BEKKERSche Funktion [1] ist zu kompliziert; sie erschwert die mathematische Bestimmung der Umfangskraft und gibt außerdem keine für die Praxis leicht anwendbare Beziehung.

In der vorliegenden Studie wird die Beziehung zwischen dem Scherdiagramm des Bodens und der Zugkraftcharakteristik des Fahrzeuges eingehend untersucht und die zwischen beiden bestehende Transformation hergeleitet. Mit Hilfe der so erarbeiteten Zusammenhänge werden aus der Zugkraft-

charakteristik des Schleppers das Scherdiagramm und einige Bodenkennzahlen bestimmt. Das hieraus entstandene Diagramm soll im folgenden als „reduziertes Scherdiagramm“ bezeichnet werden. Das reduzierte Scherdiagramm hat den Vorteil, für alle Bodentypen gleichartig aufgebaut zu sein; seine Beschreibung ist zugleich mit einfacheren mathematischen Funktionen möglich. Die Einführung des reduzierten Scherdiagrammes erleichtert damit die formelmäßige Bestimmung der Umfangskraft und ermöglicht die Verallgemeinerung der Gleichung für alle Bodentypen sowie für sämtliche Fahrwerktypen, was bisher wegen der zu komplizierten mathematischen Formeln nicht möglich war.

Verwendete Zeichen:

c	Kohäsion des Bodens [kp/cm ²]
$\mu = \operatorname{tg}\Phi$	innerer Reibungskoeffizient des Bodens
p	der mittlere Druck unter dem Fahrwerk [kp/cm ²]
K_1	eine für die Bodendeformation charakteristische Konstante [cm ⁻¹]
K_2	eine für den Kurvenverlauf charakteristische Konstante [cm ⁻¹]
$\Delta s = \sigma x$	der Abscherweg oder die Bodenverschiebung [cm]
σ	Schlupf
x	die waagerechte Koordinate des untersuchten Punktes [cm]
τ_{\max}	Höchstwert der Scherspannung [kp/cm ²]
K	Gestaltänderungskonstante des Scherdiagramms [cm]
F	Berührungsfläche zwischen Fahrwerk und Boden, Fahrwerksauflagefläche [cm ²]
b	Breite der Fahrwerksauflagefläche [cm]
l	Länge der Fahrwerksauflagefläche [cm]
$\operatorname{tg}\alpha$	Tangens des Neigungswinkels der Tangenten im Anfangspunkt des Scherdiagramms
$\operatorname{tg}\beta$	Tangens des Neigungswinkels der Tangenten im Anfangspunkt der Zugkraftcharakteristik
σ_K	Gestaltänderungskonstante der Zugkraftcharakteristik
P_K	Umfangskraft [kp]
$P_{K\max}$	höchste Umfangskraft [kp]
σ_1	der Schlupf für die Umfangskraft P_{K1}
l_1	Länge der Auflagefläche für P_{K1} [cm]

1. Das Scherdiagramm des Bodens als Grundlage für die Bestimmung der Umfangskraft

Die Zugkraft der Fahrwerke von Schleppern oder sonstigen geländegängigen Fahrzeugen wird über die konstruktiven Faktoren hinaus durch den Widerstand, den der Boden der Verschiebung, Gleitung, der Gestalt- und Formänderung entgegensezt, bestimmt. Dieser Innenwiderstand des Bodens wird durch seine Scherfestigkeit charakterisiert. Die Scherfestigkeit wird im Scherversuch ermittelt. Auf Grund der für verschiedene Bodentypen aufgenommenen Scherdiagramme teilt die Bodenmechanik die Böden in zwei Gruppen:

1. In Böden mit innerer Kohäsion, bei denen neben dem Reibungswiderstand noch andere, den inneren Zusammenhang bestimmende Kräfte wirksam sind, und

2. in Böden ohne Kohäsion, bei denen der Scherwiderstand nur durch das Abgleiten der Krümel aufeinander entsteht.

Nach COULOMB berechnet sich die Scherspannung im Boden wie folgt:

$$\text{Für Böden mit Kohäsion: } \tau = c + \mu p \quad (1)$$

$$\text{Für Böden ohne Kohäsion: } \tau = \mu p \quad (2)$$

Bei den bodenmechanischen Untersuchungen, die man im Zusammenhang mit der Geländefahrt durchgeführt hatte, wurden Torsionsabschergeräte oder solche mit Abscherkästen benutzt. Die zwei charakteristischen Grundformen der aus dem Abscherversuch gewonnenen Scherdiagramme sind die nachstehenden:

Bei kohäsionslosen Böden ist die Zunahme der Scherspannung im Boden monoton, die Scherspannung nähert sich ihrer Asymptote stetig. Die Asymptote liegt parallel zur Koordinatenachse des Abscherweges.

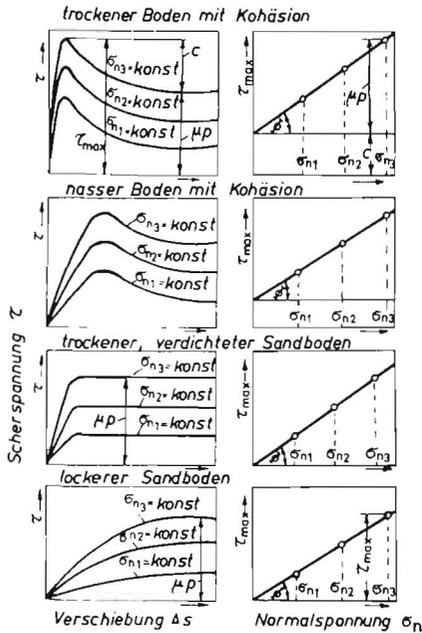


Bild 1: Auf verschiedenen Böden aufgenommene Scherdiagramme und Schergeraden in einer Zusammenstellung von W. SÖHNE [2]

Bei Böden mit Kohäsion erreicht die Scherspannung nach stetiger Zunahme ein lokales Maximum, nimmt anschließend stetig ab und nähert sich von oben ihrer zur Abscherwegkoordinatenachse parallelen Asymptote.

(Im folgenden sollen die beiden Diagramme zwecks Abkürzung nur als asymptotische beziehungsweise gespitzte Scherdiagramme bezeichnet werden.)

Die Entstehung des lokalen Maximums wurde bisher immer auf die Kohäsion zurückgeführt, und die Spitze (das lokale Maximum) wurde mit der Kohäsion gleichgesetzt (Bild 1). Bild 1 zeigt in einer Zusammenstellung von SÖHNE die auf verschiedenen Böden aufgenommenen Scherdiagramme und die daraus konstruierten Schergeraden [2].

Zur Beschreibung der Scherdiagramme gab BEKKER [1] als erster eine Funktion an, wobei er die Lösung der Differentialgleichung einer harmonischen Schwingung mit konstanter Dämpfung zu Hilfe zog. Danach lautet die Gleichung der Scherspannung:

$$\tau = \frac{c + p \cdot \operatorname{tg} \Phi}{Y} \cdot \left[\begin{aligned} & e^{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \Delta s} - \\ & - e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \Delta s} \end{aligned} \right] \quad (3)$$

Die Werte der Konstanten K_1 und K_2 sowie der Kohäsion und des inneren Reibungswinkels werden experimentell bestimmt. Die BEKKERSche Gleichung erhielt man also durch Einsetzen von Meßergebnissen. Mit Hilfe von Gl. (3) kann bei verschiedenen Werten des Schlupfes die Änderung der Scherspannung in Abhängigkeit des Abscherweges beschrieben werden.

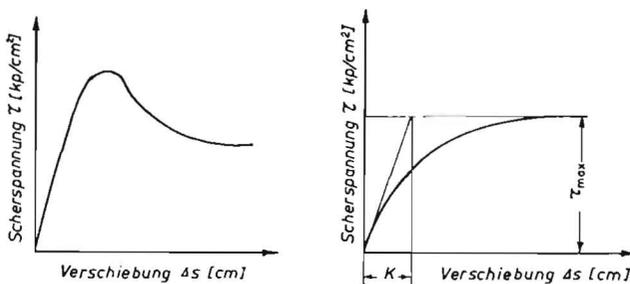


Bild 2: Spitzige und asymptotische Scherdiagramme

Zur Beschreibung von Scherdiagrammen asymptotischen Charakters schlagen JANOSI und HANAMOTO [3; 4] eine einfacher aufgebaute Funktion (Bild 2) vor:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta s}{K}} \right) \quad (4)$$

Die experimentell aufgenommenen Scherdiagramme bilden die Grundlage für die formelmäßige Berechnung der Umfangskraft. Wenn die Gleichung des Scherdiagramms bekannt ist, kann die Abscherkraft beziehungsweise die entwickelte Umfangskraft berechnet werden. Vorausgesetzt, daß die unter dem Fahrwerk entstehende, in der waagerechten Ebene wirksame Scherkraft gleich der Umfangskraft ist, ergibt das Integral der obigen Funktion nach dem Abscherweg die Umfangskraft. Das Integral wird entlang der Auflagefläche berechnet. Es ist also:

$$P_K = 2b \int_0^l \tau \cdot dx$$

Nach Ausführung des Integrals mit der Voraussetzung, daß die Belastung sich über die Aufstandsfläche gleichmäßig verteilt und auch der Schlupf konstant ist, erhält man nach Einsetzen der Integrationsgrenzen und einigen Umformungen folgende Ausdrücke:

1. Nach BEKKER [1]:

$$P_K = \frac{2l \cdot b \cdot (c + p \cdot \operatorname{tg} \Phi)}{K_1 \cdot \sigma \cdot Y \cdot l} \cdot \left[\begin{aligned} & - \frac{1}{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}} + \\ & + e^{\frac{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \sigma \cdot l}{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}}} + \frac{1}{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}} - \\ & - \frac{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \sigma \cdot l}{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}} \end{aligned} \right] \quad (5)$$

2. Nach JANOSI und HANAMOTO [3; 4] bekommt man von einer asymptotisch verlaufenden Scherspannungsänderung ausgehend:

$$P_K = F \cdot \tau_{\max} \cdot \left[1 - \frac{K}{\sigma \cdot l} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot l}{K}} \right) \right] \quad (6)$$

Zur Bestimmung der Umfangskraft stehen damit sogar zwei Gleichungen zur Verfügung, deren Benutzung jedoch stark begrenzt ist. Die BEKKERSche Gleichung kann zwar für alle Bodentypen angewendet werden, ihre Benutzung ist aber für die Praxis äußerst kompliziert. Die Gleichung von JANOSI-HANAMOTO ist mathematisch einfacher aufgebaut, kann aber nur für Böden mit asymptotisch verlaufendem Scherdiagramm Verwendung finden. Sie ist nämlich nur für diese Böden gültig. Darüber hinaus lassen sich die beiden Ausdrücke in ihrer obigen Form nur für Kettenfahrwerke anwen-

$$\begin{aligned} \text{links: } \tau &= \frac{c + p \cdot \operatorname{tg} \Phi}{Y} \cdot \left[\begin{aligned} & e^{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \Delta s} - \\ & - e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot \Delta s} \end{aligned} \right] \\ \text{rechts: } \tau &= \tau_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta s}{K}} \right) \end{aligned}$$

den. Diese Gleichungen können deshalb nicht verallgemeinert werden.

Man sieht, daß die Kenntnis des Charakters der Scherdiagramme für die Bestimmung der Umfangskraft auf mathematischem Wege sehr wichtig ist. Auf diesem Gebiet gibt es heute noch keine eindeutige und einheitliche Auffassung. Früher hielt man die Scherdiagramme mit asymptotischem Charakter nur für Böden ohne Kohäsion kennzeichnend (Bild 1). Nach neueren Abscherversuchen des Land Locomotion Laboratory [3; 4] fand man in einem Teil der Fälle auch bei bindigen Böden Scherdiagramme mit asymptotischem Charakter. Nach ungarischen Messungen [5] traten manchmal auch bei kohäsionslosen Böden gespitzte Scherdiagramme auf, wenn diese Böden verdichtet wurden. Die Tatsache, daß der Bruch bei kleineren Scherspannungen erfolgte, kann im Falle der untersuchten Böden mit der Strukturänderung erklärt werden.

Frühere Untersuchungen des Verfassers [6] haben nachgewiesen, daß entgegen der früheren Auffassung (BEKKER und SÖHNE) die gespitzte Form des Scherdiagramms nicht allein als eine Folge der Kohäsion zu betrachten ist und daß die Kohäsion und der innere Reibungskoeffizient des Bodens nicht scharf getrennt werden können. Beim Zustandekommen der größten Umfangskraft spielen beide eine Rolle. Aus dieser Feststellung folgt, daß ein Scherdiagramm mit asymptotischem Charakter auch kohäsionsbehaftete Böden beschreiben kann.

Es ist also nicht zweckmäßig, den spitzigen Charakter des Scherdiagramms besonders hervorzuheben, wie das BEKKER früher getan hat, da dies einerseits nicht der Wirklichkeit entspricht und zum andern die Bestimmung der Umfangskraft zu kompliziert macht. Es ist auch nicht sinnvoll, die auf dem asymptotisch verlaufenden Scherdiagramm basierende Umfangskraft-Bestimmungsgleichung kritiklos auf alle Bodenarten anzuwenden.

Eine wichtige Aufgabe der weiteren Untersuchungen ist daher, zu untersuchen, welchen Einfluß der Verlauf des Scherdiagramms auf die Gestaltung der Umfangskraft hat und welche Voraussetzungen bei den Näherungsverfahren zulässig sind.

2. Analyse der Beziehung zwischen dem Scherdiagramm des Bodens und der Zugkraftcharakteristik des Schleppers

Das sich im Gelände bewegende Fahrzeug entwickelt die zur Fortbewegung der eigenen und der angehängten Lasten erforderliche Zugkraft aus der Wechselbeziehung (Adhäsion) zwischen Fahrwerk und Boden. Das Fahrwerk stützt sich auf dem Boden ab, seine Greifer oder Stollen schieben und verdrängen den Boden unter gleichzeitiger Verdichtung nach hinten. Bei Zunehmen der Zugkraft übersteigt der von den Greifern auf den Boden übertragene Druck die Bodenfestigkeit und der zwischen den Greifern befindliche Bodenanteil wird abgeschert.

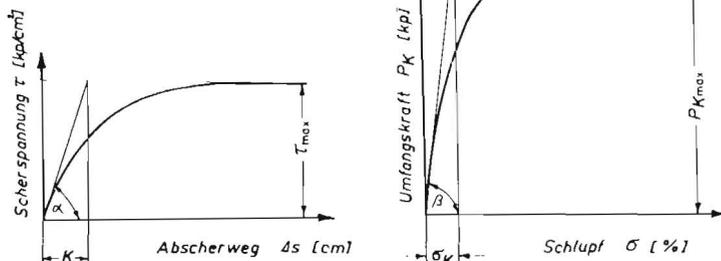
Der Greifprozeß des Fahrwerkes ist also im wesentlichen dem im Laboratorium mit Abschergeräten reproduzierten Prozeß gleich. Aus diesem Grunde muß also auch zwischen der Zugkraftcharakteristik und dem Scherdiagramm des Bodens eine Ähnlichkeit bestehen.

Im weiteren soll die Beziehung zwischen der Zugkraftcharakteristik ($P_K = f[\sigma]$) und dem Scherdiagramm ($\tau = f[\Delta s]$)

Bild 3: Die das Scherdiagramm beziehungsweise die Zugkraftcharakteristik bestimmenden wichtigsten Parameter

$$\text{links: } \tau = \tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\Delta s}{K}} \right)$$

$$\text{rechts: } P_K = F \tau_{\max} \left[1 - \frac{K}{\sigma \cdot l} \left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot l}{K}} \right) \right]$$



sowie die Ähnlichkeit zwischen beiden Funktionen durch die wichtigsten Parameter untersucht werden (Bild 3). Das Scherdiagramm soll durch folgende Größen beschrieben werden:

Neigungswinkel der Tangente im Anfangspunkt der Kurve $\text{tg}\alpha$,

Formänderungskonstante des Scherdiagramms K ,
Höchstwert der Scherspannung τ_{\max} .

Die sinngemäßen Parameter und Punkte im Verlauf der Zugkraftcharakteristik:

Neigungswinkel der Tangente im Anfangspunkt der Zugkraftcharakteristik $\text{tg}\beta$

Formänderungskonstante der Zugkraftcharakteristik σ_K
Höchstwert der Umfangskraft $P_{K\max}$.

Zu Beginn der vergleichenden Analyse beider Kurven müssen zunächst die Werte für die obigen Parameter bestimmt und zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Zu bestimmen ist also:

1. das Maß der Verdrehung der Tangenten im Koordinatenursprung, das heißt der Quotient $\text{tg}\beta/\text{tg}\alpha$,
2. die Größe der Streckung beziehungsweise Zusammendrängung zwischen den beiden horizontalen Koordinatenachsen σ_K und K ,
3. die Größe der Streckung beziehungsweise Zusammendrängung zwischen den beiden senkrechten Koordinatenachsen $P_{K\max}$ und τ_{\max} .

2.1. Das Maß der Verdrehung der Tangenten im Koordinatenursprung

Sowohl beim Scherdiagramm als auch bei der Zugkraftcharakteristik müssen die Werte $\text{tg}\alpha$ und $\text{tg}\beta$ für die Neigungswinkel der beiden Tangenten bestimmt werden.

Das Scherdiagramm wird durch folgende Gleichung für die Änderung der Scherspannung beschrieben:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta s}{K}} \right)$$

Der Tangens des Winkels α kann durch Differenzieren der obigen Funktion nach Δs bestimmt werden, da der Differentialquotient geometrisch dem Tangens des Neigungswinkels der an die Kurve gelegten Berührungsgeraden entspricht. Es ist also:

$$\text{tg}\alpha = \frac{d\tau}{d(\Delta s)} = \frac{\tau_{\max}}{K} \cdot e^{-\frac{\Delta s}{K}}$$

Im Koordinatenursprung ist $\Delta s = 0$, so daß wir für $\text{tg}\alpha$ den Ausdruck

$$\left. \text{tg}\alpha \right|_{\Delta s = 0} = \frac{\tau_{\max}}{K} \quad (7)$$

erhalten.

Man müßte bei der die Zugkraftcharakteristik beschreibenden Funktion ähnlich vorgehen.

Die Gleichung für die Umfangskraft erhielt man nach Integrieren von Gl. (4) für die Scherspannungsänderung in folgender Form:

$$P_K = F \cdot \tau_{\max} \cdot \left[1 - \frac{K}{\sigma \cdot l} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot l}{K}} \right) \right] \quad (8)$$

Diese Beziehung gibt bei gegebenem Schlepper und $\sigma = \text{const.}$ die Größe der entwickelbaren Zugkraft an. Dies entspricht in der Zugkraftcharakteristik geometrisch gesehen einem Punkt bei konstantem Schlupf. Faßt man jedoch den Schlupf σ als eine Veränderliche auf, so kann Gl. (8) als der analytische Ausdruck für die Zugkraftcharakteristik angesehen werden.

Diese Gleichung ist an der Stelle $\sigma = 0$ unstetig und hat keinen festen Wert. In diesem Punkt ist daher die Bestimmung des Tangentenneigungswinkels durch unmittelbares Differenzieren nicht möglich, es muß also nach anderen Lösungswegen gesucht werden.

Da die Funktion an der Stelle $\sigma = 0$ einen Grenzwert besitzt, kann durch Erweiterung des Deutungsintervalls auf 0 angenommen werden, daß die Funktion an dieser Stelle gleich ihrem Grenzwert ist. Damit wird die bisher unstetige Funktion an der Stelle 0 in eine stetige Funktion mit dem gleichen Grenzwert umgewandelt. Nachstehend wird gezeigt, daß diese Funktion an der Stelle 0 eine Ableitung besitzt. Dazu soll die Funktion in eine TAYLORSche Reihe entwickelt werden. Wie bekannt, gilt

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots$$

Ähnlich erhält man für die untersuchte Funktion:

$$e^{-\frac{\sigma \cdot l}{K}} = 1 - \frac{\sigma \cdot l}{K} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(\sigma \cdot l)^2}{K^2} - \frac{1}{6} \times \frac{(\sigma \cdot l)^3}{K^3} + \dots + \frac{(\sigma \cdot l)^n}{K^n} \pm \dots$$

Diesen Ausdruck in der Gleichung für die Umfangskraft eingesetzt und die Ausdrücke umgestellt erhält man:

$$P_K = F \cdot \tau_{\max} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma \cdot l}{K} - \frac{1}{6} \cdot \frac{(\sigma \cdot l)^2}{K^2} + \frac{1}{24} \cdot \frac{(\sigma \cdot l)^3}{K^3} \pm \dots \right]$$

Obige Funktion nach σ abgeleitet:

$$\frac{d P_K}{d \sigma} = F \cdot \tau_{\max} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{l}{K} - \frac{1}{3} \cdot \frac{l^2 \sigma}{K^2} + \frac{1}{8} \cdot \frac{l^3 \cdot \sigma^2}{K^3} - \dots + \dots \right]$$

Setzt man in diesem Ausdruck $\sigma = 0$, so erhält man den Tangens des Neigungswinkels der an die Kurve der Zugkraftcharakteristik im Anfangspunkt gelegten Tangente. Es ist also

$$\text{tg} \beta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\tau_{\max}}{K} \cdot F \cdot l \quad (9)$$

Gemäß Gl. (7) gilt $\frac{\tau_{\max}}{K} = \text{tg} \alpha$, so daß Gl. (9) wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\text{tg} \beta = \frac{1}{2} \text{tg} \alpha \cdot F \cdot l$$

beziehungsweise

$$\frac{\text{tg} \beta}{\text{tg} \alpha} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot l$$

Sofern die Auflagefläche des Fahrwerkes sowohl beim Ketten- als auch beim Radfahrwerk als rechteckiges Viereck mit der Länge l und der Breite b angenommen wird, erhält man mit $F = 2b \cdot l$, die Gleichung:

$$\frac{\text{tg} \beta}{\text{tg} \alpha} = b \cdot l^2 \quad (10)$$

Gl. (10) stellt das Maß der Verdrehung zwischen den beiden Anfangstangenten um den Koordinatenursprung dar. Man sieht, daß das Maß der Verdrehung mit der Breite der Auflagefläche linear und mit deren Länge quadratisch wächst. Je länger also die Auflagefläche ist, desto steiler nimmt die Zugkraftcharakteristik zu. Es bedeutet weiterhin, daß zu den niedrigeren Schlupfwerten höhere Umfangskräfte gehören.

2.2. Das Maß der Schrumpfung oder Streckung zwischen den waagerechten Koordinatenachsen

Zu bestimmen ist aus dem Scherdiagramm und der Zugkraftcharakteristik das Verhältnis zwischen den beiden Gestaltungsänderungskonstanten K und σ_K . Aus Bild 3 kann für die Ausgangstangente der Zugkraftcharakteristik

$$\text{tg} \beta = \frac{P_{K_{\max}}}{\sigma_K}$$

geschrieben werden. Nach Gl. (9) ist aber

$$\text{tg} \beta = \frac{\tau_{\max} \cdot F \cdot l}{2K}$$

Nach Gleichsetzen erhält man daraus:

$$\frac{P_{K_{\max}}}{\sigma_K} = \frac{\tau_{\max} \cdot F \cdot l}{2K}$$

Die größte Umfangskraft läßt sich aus Gl. (8) in folgender Form ausdrücken:

$$P_{K_{\max}} = F \cdot \tau_{\max} \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right) \quad (11)$$

Der Wert von l ist gegenüber K auch beim größten Schlupf $\sigma = 1,0$ und kurzen Auflagelängen noch ausreichend groß, und $e - \frac{\sigma l}{K}$ kann größenordnungsmäßig vernachlässigt werden.

Die für die höchste Umfangskraft erhaltene Gl. (11), in den obigen Ausdruck eingesetzt, ergibt:

$$\frac{F \cdot \tau_{\max} \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right)}{\sigma_K} = \frac{\tau_{\max} \cdot F \cdot l}{2K}$$

oder nach einigen Umformungen:

$$\sigma_K = 2 \left[\frac{K}{l} - \frac{K^2}{l^2} \right] \quad (12)$$

Obige Gleichung nach K aufgelöst, ergibt:

$$K^2 - l \cdot K + \frac{1}{2} \cdot \sigma_K \cdot l^2 = 0$$

Die beiden Teillösungen sind:

$$K_1 = \frac{l}{2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - 2\sigma_K} \right]$$

und

$$K_2 = \frac{l}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - 2\sigma_K} \right] \quad (13)$$

Wenn man bedenkt, daß die Gestaltungsänderungskonstante K des Scherdiagramms die Größe von etwa 1—2 cm hat, also viel kürzer als die Auflagelänge ist, kann leicht entschieden werden, daß von den Teillösungen nur die zweite den Tatsachen entspricht.

Die Gl. (12) und (13) geben den Zusammenhang zwischen den Gestaltungsänderungskonstanten des Scherdiagramms K und der Zugkraftcharakteristik σ_K an. Sie geben des weiteren

das Maß der Schrumpfung oder Streckung für die waagerechten Koordinatenachsen der Kennlinien im Bezug auf σ_K beziehungsweise K an.

2.3. Das Maß der Streckung beziehungsweise Schrumpfung zwischen P_{Kmax} und τ_{max} entlang der senkrechten Koordinatenachse

Das Maß der Streckung entlang der senkrechten Koordinatenachse der Zugkraftcharakteristik errechnet sich für die höchste Umfangskraft aus der Beziehung zwischen P_{Kmax} und τ_{max} . Die höchste Zugkraft ist nämlich:

$$P_{Kmax} = F \cdot \tau_{max} \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right),$$

und die maximale Scherspannung: τ_{max} .

Damit ergibt ihr Verhältnis den Ausdruck:

$$\frac{P_{Kmax}}{\tau_{max}} = F \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right) \quad (14)$$

Gl. (14) gibt die Beziehung zwischen der höchsten Umfangskraft und der größten Scherspannung an. Das Maß der auf die Zugkraftcharakteristik bezogenen Streckung ist eine Funktion der Abmessungen der Auflagefläche und der Gestaltänderungskonstanten des Scherdiagramms.

Die vorstehend aufgeführten Untersuchungen wiesen damit die Richtigkeit der Ausgangshypothese nach. Damit sind folgende Schlußfolgerungen erlaubt:

Zwischen der Zugkraftcharakteristik und dem Scherdiagramm existiert eine bestimmte Beziehung, die sich mathematisch verhältnismäßig einfach ausdrücken läßt. Es sind nämlich die Gleichungen für beide Kennlinien bekannt. Ihre Form ist schon bestimmt, die Beziehung zwischen den beiden läßt sich festlegen. Es kann damit auch festgestellt werden, wie diese die Kennlinienverläufe bestimmenden Parameter ineinander übergehen.

In Kenntnis des einen Parameters lassen sich die anderen berechnen.

Aus der obigen Analyse geht hervor, daß die Beziehungen zwischen den für die Kennlinienverläufe ausschlaggebenden Parameter für den betreffenden Boden nur durch die geometrischen Abmessungen des Fahrwerkes bestimmt werden. Diese Zusammenhänge gehen aus Tafel 1 hervor:

Zu Tafel 1 ist folgendes zu bemerken:

Zeile 1: Die Steilheit der Zugkraftcharakteristik ($tg\beta$) hängt bei gegebenem Boden ($tg\alpha$) von den geometrischen Abmessungen der Fahrwerksauflagefläche ab. Von besonderer Bedeutung ist hier die Länge der Auflagefläche (man denke an l^2) gegenüber der Breite b . Dies erklärt auch den Vorteil der Triebräder mit großem Durchmesser oder auch die gute Zugfähigkeit der Kettenschlepper.

Zeile 2: Die Wichtigkeit der Länge der Fahrwerkaufstandsfläche wird auch durch die Beziehung zwischen K und σ_K hervorgehoben. Bei der Festlegung der Abmessungen der

Fahrwerkaufstandsfläche sollte man möglichst bestrebt sein, ihre Länge zu vergrößern.

Zeile 3: Nach der dritten Beziehung ist der erreichbare Höchstwert der Umfangskraft eine Funktion der Bodenkennwerte, des Adhäsionsgewichts und der Länge und Breite der Auflagefläche. Den theoretischen Höchstwert $P_{Ktheor} = F \cdot \tau_{max}$ der Umfangskraft könnte man nur mit unendlich langem Kettenfahrwerk oder mit Triebrädern unendlichen Durchmessers erzielen. Bei Fahrwerken mit endlicher Abmessung kann dieser Wert auf gegebenem Boden für gegebenes Adhäsionsgewicht desto besser angenähert werden, je länger die Auflagefläche gemacht wird. Daraus folgt, daß bei Kettenschleppern die Scherfestigkeit des Bodens besser als bei Radtraktoren ausgenutzt wird.

Bei gegebenem Adhäsionsgewicht und festgelegten geometrischen Abmessungen hängt der Höchstwert der Umfangskraft neben der Scherfestigkeit auch von der Gestaltänderungskonstanten K des Bodens ab.

Außerdem kann noch festgestellt werden, daß die experimentell bestimmten größten Umfangskräfte niemals den theoretisch berechneten Höchstwert erreichen.

Demzufolge kann auch das Verhältnis von höchster gemessener Umfangskraft zu Auflagefläche nicht mit dem tatsächlichen Scherwiderstand des Bodens gleich sein:

$$\frac{P_{Kmax}}{F} \neq \tau_{max}$$

Es ist viel mehr:

$$\frac{P_{Kmax}}{F \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right)} = \tau_{max} = c + \mu \cdot p \quad (15)$$

Dieser Satz bedeutet darüber hinaus auch eine Korrektur der MICKLEWITSCHEN Gl. [7], nämlich $P_{Kmax} = F \cdot (c + \mu \cdot p)$. Die geometrischen Abmessungen haben also sowohl bei Böden mit Kohäsion als auch bei Böden ohne Kohäsion einen Anteil an der Entstehung der Umfangskraft. Sie spielen auch für die Bestimmung der Scherspannung eine wichtige Rolle. Diese Feststellung gilt auch für die mit verschiedenen Abschergeräten durchgeführten Messungen. Die mit bodenmechanischen Methoden aufgenommenen und bestimmten Bodenparameter, in erster Linie für bodenmechanische Untersuchungen vorgesehen, können für die Theorie der Geländefahrt nicht verwendet werden, ohne gewisse Erwägungen anzustellen. Dies rührt daher, daß in der Theorie der Geländefahrt den geometrischen Abmessungen eine wesentlich höhere Bedeutung zuzumessen ist, da sie hohen Einfluß auf die übrigen Größen haben.

3. Bestimmung der bodenphysikalischen Kennzahlen auf Grund der Zugkraftcharakteristik

Wie aus den im vorigen Kapitel gemachten Ausführungen festgestellt werden kann, widerspiegeln die in Feldversuchen

Tafel 1: Beziehungen zwischen den Kennwerten

Scherdiagramm	Zugkraftcharakteristik	Beziehungen zwischen den Kennwerten	
1 $tg\alpha$	$tg\beta$	$tg\beta = b \cdot l^2 \cdot tg\alpha$	$tg\alpha = \frac{tg\beta}{b \cdot l^2}$
2 K	σ_K	$\sigma_K = 2 \cdot \left(\frac{K}{l} - \frac{K^2}{l^2} \right)$	$K = \frac{l}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \sigma_K} \right)$
3 τ_{max}	P_{Kmax}	$P_{Kmax} = F \cdot \tau_{max} \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right)$	$\tau_{max} = \frac{P_{Kmax}}{F \cdot \left(1 - \frac{K}{l} \right)}$

aufgenommenen Zugkraftcharakteristiken das Scherdiagramm des Bodens, und es können daraus auch die bodenphysikalischen Kennwerte mit höherer Genauigkeit als aus Laborversuchen ermittelt werden. Die Genauigkeit der somit erhaltenen Werte hängt natürlich auch davon ab, mit welcher Genauigkeit die Ausgangskurve aufgenommen wurde.

Zur Bestimmung der für den Boden charakteristischen Werte lassen sich die oben erarbeiteten Zusammenhänge zwischen Zugkraftcharakteristik und Scherdiagramm benutzen. Im einzelnen bedeutet dies:

1. Es ist die Tangente der Zugkraftcharakteristik im Anfangspunkt zu zeichnen und der Tangens des Neigungswinkels der Tangente zu bestimmen. In Kenntnis von $\operatorname{tg}\beta$ und der Auflagefläche des Fahrwerkes ermittelt sich der Tangens für die Anfangstangente des Scherdiagramms aus nachstehender Formel:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\operatorname{tg}\beta}{b \cdot l^2}$$

2. Nach Konstruktion der Tangenten der Zugkraftcharakteristik läßt sich auch die Gestaltänderungskonstante σ_K bestimmen. In Kenntnis von σ_K kann zugleich auch die Gestaltänderungskonstante K des Scherdiagramms berechnet werden:

$$K = \frac{l}{2} \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \sigma_K})$$

3. Den Wert der maximalen Scherspannung kann man aus der in der Zugkraftcharakteristik abgelesenen Umfangskraft bei gegebenem Schlupf bestimmen. Es ist nämlich:

a) Beim größten Schlupf ($\sigma = 1,0$):

$$\tau_{\max} = \frac{P_{K,r}}{F \cdot \left(1 - \frac{K}{l}\right)}$$

b) Oder bei beliebigem Schlupf σ

$$\tau_{\max} = \frac{P_{K,r,\max}}{F_r \cdot \left[1 - \frac{K}{\sigma_r \cdot l_r} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_r \cdot l_r}{K}}\right)\right]}$$

4. Da die Scherspannung mit der Gleichung $\tau_{\max} = c + \mu \cdot p$ bestimmt wird, müssen auch die Kohäsion c und der Reibungsbeiwert μ ermittelt werden. Für die Bestimmung der Kohäsion und des Reibungsbeiwertes eines Bodens müssen mit demselben Fahrwerk mindestens zwei bei verschiedenen Adhäsionsgewichten aufgenommene Meßwerte (Zugkraftcharakteristiken) gewonnen werden. Aus diesen beiden für verschiedene Adhäsionsgewichte gültigen Zugkraftcharakteristiken können $\tau_{\max 1}$, $\tau_{\max 2}$ berechnet werden. In Kenntnis der beiden Scherspannungen wird das nachstehende Gleichungssystem aufgestellt:

$$\begin{aligned} \tau_{\max 1} &= c + \mu \cdot p_1 \\ \tau_{\max 2} &= c + \mu \cdot p_2 \end{aligned}$$

Die Auflösung des Gleichungssystems nach μ und c ergibt:

$$\mu = \frac{\tau_{\max 1} - \tau_{\max 2}}{p_1 - p_2} \quad (16)$$

und

$$c = \frac{\tau_{\max 1} \cdot p_2 - \tau_{\max 2} \cdot p_1}{p_2 - p_1} \quad (17)$$

Auf die obenbeschriebene Art und Weise lassen sich also für das Scherdiagramm die Werte von $\operatorname{tg}\alpha$, K , τ_{\max} , c und μ bestimmen. In Besitz dieser Parameter kann man den Boden hinreichend gut beschreiben und auch das Scherdiagramm aufzeichnen.

Ein Mangel der obenbeschriebenen Methode besteht jedoch darin, daß es nur ungenau gelingt, eine Tangente im An-

fangspunkt an die Zugkraftcharakteristik zu legen. So wird nämlich auch die Gestaltänderungskonstante K des Scherdiagramms für den betreffenden Boden ungenau, und auch die Werte von c und μ sind mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Es erscheint demnach zweckmäßig, für die Bestimmung dieser Parameter ein anderes, für die Praxis brauchbares Näherungsverfahren zu suchen.

3.1. Näherungsweise Bestimmung der Gestaltänderungskonstante K des Scherdiagramms

Es werden in der Zugkraftcharakteristik zwei nahe bei einander liegende Punkte P_{K1} und P_{K2} und die dazu gehörigen Schlupfwerte σ_1 beziehungsweise σ_2 vorgewählt.

Das Verhältnis V der somit vorgegebenen aus der Zugkraftcharakteristik abgelesenen Umfangskräfte ist:

$$\frac{P_{K1}}{P_{K2}} = V$$

oder

$$P_{K1} = V \cdot P_{K2}$$

oder ausführlich ausgeschrieben:

$$\begin{aligned} F_1 &= \tau_{\max 1} \left[1 - \frac{K}{\sigma_1 \cdot l_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_1 \cdot l_1}{K}}\right)\right] = \\ &= V \cdot F_2 \cdot \tau_{\max 2} \left[1 - \frac{K}{\sigma_2 \cdot l_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_2 \cdot l_2}{K}}\right)\right] \end{aligned}$$

Da die Differenz zwischen P_{K1} und P_{K2} relativ klein ist, bedeutet es für Radtraktoren keinen Fehler, wenn man voraussetzt, daß die zu verschiedenen Adhäsionsgewichten gehörigen Auflageflächen einander gleich sind. Mathematisch:

$$\begin{aligned} F_1 &= F_2 \\ l_1 &= l_2 \end{aligned}$$

und

$$\tau_{\max 1} = \tau_{\max 2}$$

Nach Einführung dieser Vereinfachungen in der obigen Gleichung bekommt man:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{K}{\sigma_1 \cdot l_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_1 \cdot l_1}{K}}\right) &= V \cdot \left[1 - \frac{K}{\sigma_2 \cdot l_2} \cdot \right. \\ &\quad \left. \times \left(1 - e^{-\frac{\sigma_2 \cdot l_2}{K}}\right)\right] \end{aligned}$$

Auf beiden Seiten der Gleichung kann der Exponentialterm für größere Schlupfwerte vernachlässigt werden. Die Gleichung vereinfacht sich damit zu:

$$1 - \frac{K}{\sigma_1 \cdot l_1} = V \cdot \frac{V \cdot K}{\sigma_2 \cdot l_2}$$

Unter Beachtung von $l_1 \approx l_2$ und nach einigen Umformungen erhält man:

$$K = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot l_1 \cdot (1 - V)}{\sigma_2 - V \sigma_1} \quad (18)$$

Wegen der erforderlichen Vernachlässigungen, die in der obigen Ableitung gemacht werden müssen, sollen die Kräfte P_{K1} und P_{K2} in dem Abschnitt der Zugkraftcharakteristik aufgenommen werden, der sich meßtechnisch gut beherrschen läßt und wo der Schlupf schon ausreichend groß ist. Bei Radtraktoren liegt dieser Schlupf im Bereich $\sigma = 30-40\%$ und bei Kettenschleppern $\sigma = 10-15\%$. Um die sich aus der Meßungenauigkeit und der Streuung der Meßwerte ergebende Unsicherheit auf ein erträgliches Maß herab-

zusetzen, erscheint es zweckmäßig, im oben genannten Bereich 2—3 Punktpaare zu nehmen (z. B. $\sigma = 30$ und 35% ; $\sigma = 35$ und 40% ; $\sigma = 40$ und 45%) und den Mittelwert der so bestimmten Werte für K bilden. Diesen Mittelwert kann man als den endgültigen Wert von K betrachten.

Die oben abgeleitete Beziehung vereinfacht die Bestimmung der Konstanten K und führt auf eine höhere Genauigkeit als die vorhergehende auf der Konstruktion der Anfangstangente basierende Methode. Diese hohe Genauigkeit wird trotz der Vereinfachungen erreicht. Bei gummibereiften Fahrwerken weicht der Näherungswert der Konstanten K höchstens 1—2% vom theoretischen Wert ab.

3.2. Bestimmung von Scherfestigkeit, Kohäsion und Reibungskoeffizient des Bodens

Neben der Bestimmung der Gestaltänderungskonstanten K muß man auch bei der Bestimmung der Bodenschersfestigkeit mit größter Sorgfalt vorgehen. Am einfachsten ließe sich die Scherfestigkeit des Bodens aus der gemessenen höchsten Umfangskraft berechnen (siehe 2.3. und 2.4.). Es ist aber sehr schwer, den Höchstwert der Zugkraft beziehungsweise der Umfangskraft genau zu messen. Es ist empfehlenswert, die Umfangskraft bei geringeren Schlupfwerten zu messen und diese in die Berechnung einzubeziehen. Weiterhin müssen auch der Zuwachs des Schlupfes und das damit verbundene Eindringen des Rades in den Boden in Betracht gezogen werden, weil damit eine Zunahme der Auflagefläche erfolgt. Sofern der Schlupf und das zugehörige Eindringen des Rades unbekannt sind, empfiehlt es sich, den Wert von τ_{\max} aus der Umfangskraft bei $\sigma = 20$ — 30% zu bestimmen. Hier kann nämlich eine genauere Zugkraftmessung als bei $\sigma = 100\%$ erfolgen, außerdem ist hierbei das Eingraben des Rades noch unwesentlich, und auch die Auflagefläche des Reifens kann der statischen Auflagefläche gleichgesetzt werden.

Für die Bestimmung der Kohäsion und des Reibungskoeffizienten müssen also mit dem selben Schlepper (Fahrwerk) Zugkraftcharakteristiken für verschiedene Adhäsionsgewichte aufgenommen werden, aus denen die zum Schlupf $\sigma = 20$ bis 30% gehörigen Umfangskräfte abgelesen werden können. Um die durch Meßungenauigkeiten verursachte Streuung der Meßwerte herabzusetzen, ist es zweckmäßig, die erhaltenen Werte in Abhängigkeit vom Adhäsionsgewicht aufzutragen und die erhaltenen Punkte durch eine Näherungskurve zu verbinden. Mit Hilfe dieser Näherungskurven lassen sich die Werte für τ_{\max} , c und μ auf die beschriebene Weise bestimmen. Die kleinste Änderung des Neigungswinkels der Näherungskurve zieht eine beachtliche Abweichung der Werte von c und μ nach sich. Um die Genauigkeit der durch die Meßpunkte hindurchzulesenden Näherungskurven zu verbessern, müssen mehrere Meßreihen durchgeführt und im Diagramm aufgetragen werden.

Die vorstehend erarbeiteten Zusammenhänge zwischen dem Scherdiagramm und der Zugkraftcharakteristik ermöglichen also die Ausarbeitung einer Methode, mit deren Hilfe die für den Boden charakteristischen physikalischen Kennwerte aus der Zugkraftcharakteristik berechnet werden können.

Die Zugkraftversuche an Schleppern lassen sich damit auch bei der Bestimmung von Bodenparametern verwerten; sie machen auch die relativ komplizierten Abscherversuche mit entsprechenden Abschergeräten unnötig.

Vorteile der entwickelten Methode sind:

1. Ausgangsgrundlage des beschriebenen Verfahrens bildet die Zugkraftcharakteristik, das heißt die am Schlepper im Gelände gemessene Zugkraft; die so bestimmten Bodenkennwerte dienen letzten Endes ebenfalls als Grundlage für die Bestimmung der Umfangskraft. Dadurch erhält man bei den Berechnungen ein genaues Ergebnis, entfallen doch bei diesem Verfahren alle Fehler, die in den einzelnen Phasen des Rechnungsganges durch Ungenauigkeiten entstünden.

2. Dieses Verfahren beseitigt auch jene Fehler, die bei den Messungen mit Abschergeräten entstehen würden. Bei der Entstehung der Scherspannung spielen beim Abscherversuch gemäß unseren früheren Untersuchungen und Gl. (16) auch die geometrischen Abmessungen des Meßgerätes eine Rolle. Diese Tatsache wurde bislang immer außer Acht gelassen. Aus diesem Grunde sind alle in der Literatur veröffentlichten einschlägigen Meßwerte als ungenau anzusehen, da sie mit verschiedenen Meßgerätetypen aufgenommen wurden und wegen der verschiedenen geometrischen Abmessungen dieser Meßgeräte miteinander nicht verglichen werden können.

3. Nach der beschriebenen Methode erhält man Mittelwerte für die untersuchten Größen, die sonst bei Messung mit Abschergeräten nur durch zahlreiche Wiederholungen und statistische Aufarbeitung der Meßergebnisse erhalten werden könnten.

4. Die erhaltenen Werte beziehen sich auf die obere Bodenschicht, sie beinhalten auch den Einfluß von Bodenzustand, Oberflächenform, Pflanzenbewuchs. Diese Werte sind demnach geeignet, den Boden ausgesprochen vom Standpunkt der Zugfähigkeit aus zu kennzeichnen.

4. Einfluß der Form des Scherdiagramms auf die Zugkraftcharakteristik

Als Grundlage der bisher durchgeführten Untersuchungen diente ein Scherdiagramm, bei dem die Scherspannung in Abhängigkeit des Abscherweges stetig zunahm und einen Maximalwert asymptotisch annäherte. Im Hinblick darauf, daß in manchen Fällen die früheren Untersuchungen nicht asymptotische, sondern spitzig verlaufende Kennlinien ergaben, müssen auch diese Fälle untersucht und die nachstehenden Fragen beantwortet werden:

Wie beeinflusst die Form des Scherdiagramms bei gegebenem Schlepper die Zugkraftcharakteristik?

Lassen sich die hergeleiteten Beziehungen zur Bestimmung

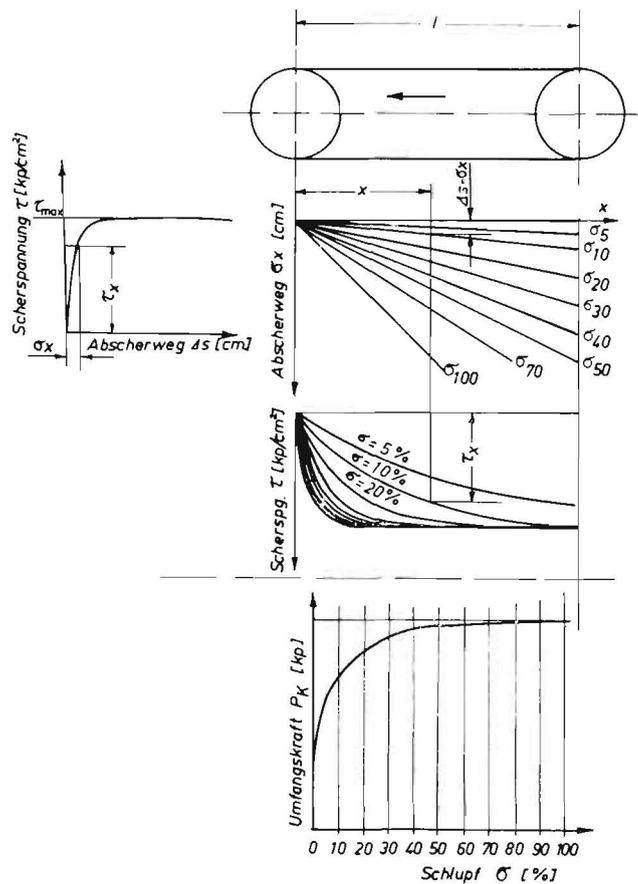


Bild 4: Graphische Ermittlung der von einem Kettenschlepper entwickelten Zugkraft

stik für die Praxis ohne Interesse. Nach Aufnahme verschiedener Punktpaare der Zugkraftcharakteristik „b“ errechnet sich die Scherkonstante nach der Formel:

$$K = \frac{\sigma_1 \sigma_2 l_1 (1-x)}{\sigma_2 - x\sigma_1}$$

Die aus den aufgenommenen Punktpaaren errechneten K -Werte sind:

$$\begin{aligned} K &= 1,16 \quad \text{für } \sigma_5 - \sigma_{10} \\ K &= 0,92 \quad \text{für } \sigma_{10} - \sigma_{20} \\ K &= 1,12 \quad \text{für } \sigma_{20} - \sigma_{30} \\ K &= 1,04 \quad \text{für } \sigma_{30} - \sigma_{50} \end{aligned}$$

Daraus der Mittelwert für K :

$$K = \frac{1,16 + 0,92 + 1,12 + 1,04}{4} = 1,06 \text{ cm}$$

In Kenntnis der Scherkonstanten K läßt sich die Scherfestigkeit des Bodens bestimmen. Ausgehend von der Umfangskraft bei $\sigma = 10\%$ ergibt sich für die Bodenschersfestigkeit der Wert:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{P_{Kl}}{F \cdot \left[1 - \frac{K}{l} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot l}{K}} \right) \right]} = \\ &= \frac{1973}{6120 \cdot \left[1 - \frac{1,06}{170} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,1 \cdot 170}{1,06}} \right) \right]} = 0,34 \text{ kp/cm}^2. \end{aligned}$$

Die Originalwerte mit den gerechneten verglichen, erhält man für die Kennwerte des Scherdiagramms:

Kennwerte	Ausgangs- Werte	transformierte
K	2,0	1,06
τ_{\max}	0,340	0,340

Aus dem obigen Vergleich ist deutlich abzulesen, daß die Ausgangswerte und die berechneten Werte von τ_{\max} gleich sind. Dies bedeutet, daß die Transformation die für den Boden charakteristischen Werte der Kohäsion und des Reibungswertes praktisch unverändert wiedergibt. Es hat sich hingegen die Größe der Gestaltänderungskonstanten des Scherdiagramms verändert. Diese Veränderung der Konstanten K zieht die Änderung der Form des neuen Scherdiagramms nach sich. Das neue Scherdiagramm, das sich mit K und τ_{\max} vollständig beschreiben läßt, da letztere die Gleichung erfüllen, kann in allen Fällen mit asymptotischem Charakter angenommen werden (Bild 6).

Wenn man also die oben beschriebene Methode auf spitzig verlaufende Scherdiagramme anwendet, bekommt man nicht die getreue Form des Ausgangsscherdiagramms zurück, da dieses mit im wesentlichen unveränderten Scherfestigkeitswerten zu einem Diagramm mit asymptotischem Charakter reduziert wird. Die Konstante K dieses reduzierten Scherdiagramms ist ebenfalls ein reduzierter Wert. Sie läßt sich trotzdem sehr gut sowohl für die Bestimmung der bodenphysikalischen Kennwerte als auch im Besitz dieser letzteren Werte für die weiteren Zugkraftberechnungen anwenden. Die Reduktion von K verändert nur dessen Wert und auch den Charakter des Scherdiagramms, nicht aber die für die Scherfestigkeit charakteristischen Faktoren.

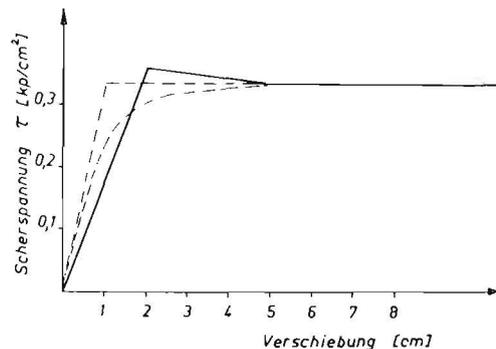


Bild 6: Reduziertes Scherdiagramm

Dieses Verfahren kann selbstverständlich theoretisch nicht für exakt gelten, da die Bestimmung der Konstanten K nur näherungsweise erfolgte, und die mit diesen Konstanten ermittelten Scherfestigkeiten können sich ebenfalls ändern. Die Änderung ist aber derart klein, daß sie manchmal gar nicht nachgewiesen werden kann. Somit sind die erhaltenen Ergebnisse für die Praxis als real und brauchbar zu betrachten.

Die abgeleitete und hinsichtlich Richtigkeit überprüfte Methode eignet sich damit für alle Bodenarten. Mit ihrer Hilfe kann aus den in Feldversuchen aufgenommenen Daten (Zugkraftcharakteristiken) jeder, für den Boden charakteristische physikalische Kennwert (wie Scherspannung, Kohäsion, und innerer Reibungskoeffizient) rechnerisch ermittelt werden.

Mit der beschriebenen Methode kann aber nicht nur die Kohäsion oder der Reibungskoeffizient, sondern auch die zu diesen gehörige, für den Boden charakteristische, reduzierte Gestaltänderungskonstante errechnet werden. Da die Bestimmung der Kohäsion und des inneren Reibungskoeffizienten in der Praxis immer nur mit gewisser Näherung möglich ist, und sich die reduzierte Gestaltänderungskonstante dagegen recht genau berechnen läßt, empfiehlt es sich für die Bestimmung und Angabe des Bodencharakters neben der Kohäsion und des Reibungskoeffizienten auch die reduzierte Gestaltänderungskonstante heranzuziehen.

Die beschriebene Rechenmethode reduziert die Scherdiagramme mit gespitzter Form in solche mit asymptotischem Verlauf. Die Einführung der reduzierten Scherdiagramme macht es weiterhin möglich die für die asymptotischen Scherdiagramme ausgearbeiteten einfacheren Gleichungen für alle Bodenarten zu verallgemeinern.

Zusammenfassung

Bei der mathematischen Bestimmung der Umfangskraft darf nach Meinung des Verfassers der Charakter des Scherdiagramms des Bodens nicht außer Acht gelassen werden.

Es wurde deshalb die Beziehung zwischen dem Scherdiagramm und der Zugkraftcharakteristik untersucht und die zwischen diesen bestehende Transformation abgeleitet. Auf Grund des gefundenen funktionellen Zusammenhanges wurde eine Methode erarbeitet, mit deren Hilfe aus der Zugkraftcharakteristik des Schleppers das Scherdiagramm und die physikalischen Kennwerte des Bodens ermittelt werden können. Das auf diese Weise ermittelte Scherdiagramm wurde als „reduziertes Scherdiagramm“ bezeichnet, da die erkannte Transformation Scherdiagramme jeglicher Form in solche mit asymptotischem Charakter verwandelt.

Das reduzierte Scherdiagramm ergibt neben Kohäsion und inneren Reibungskoeffizienten auch die Gestaltänderungskonstante des Bodens und ermöglicht damit eine genauere Beschreibung des Bodens als bisher.

Die Einführung des reduzierten Scherdiagrammes ermöglicht weiterhin die Verallgemeinerung der Formel der Umfangskraft auf alle Bodenarten, was bisher bekanntlich nicht möglich war.

Schrifttum

- [1] BEKKER, M. G.: Theory of landlocomotion. The mechanics of vehicle mobility. Ann. Arbor: The University of Mich. Press. 1965
- [2] SÖHNE, W.: Wechselbeziehungen zwischen Fahrzeuglaufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn. In: Grundlagen der Landtechnik, Heft 13, Düsseldorf 1959, S. 21—34
- [3] JÁNOSI, Z. und B. HANAMOTO: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. — In: 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Turin 1961
- [4] JÁNOSI, Z.: An analysis of pneumatic tire performance on deformable soils. — In: 1st Internat. Conf. on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Turin 1961
- [5] KÉZDI, A.: Bodenmechanik. Bd. I. Lehrbuchverlag, Budapest 1960
- [6] KOMÁNDI, Gy.: Zusammenfassung und Einschätzung der wichtigsten Forschungsthemen und der erreichten Ergebnisse in der Theorie der Geländefahrt. Fahrzeuge-Landmaschinen 12 (1965), S. 388—396
- [7] MICKLETHWAITE, E. W. E.: Soil mechanics in relation to fighting vehicles. School of Tank Technology. Chertsey 1944
- [8] BEKKER, M. G.: Die Mechanik der Geländefahrt. Landtechnische Forschung 13 (1963), S. 70—78
- [9] SÖHNE, W.: Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. In: Grundlagen der Landtechnik, Heft 5, Düsseldorf 1953, S. 49—63

Résumé

György Komándi: "Determination of Physical Soil Coefficients on Account of the Relationship between Shear Diagram and Traction Characteristic"

According to the author's opinion the character of the shear diagram of the soil must not be neglected at the mathematical determination of the circumferential force.

Therefore, the relation between shear diagram and soil characteristics was examined and the existing transformation

derived. On account of the functional relationship found, a method was developed by means of which the shear diagram and the physical soil coefficients can be obtained from the traction characteristic of the tractor. The shear diagram received in this way was designated as „reduced shear diagram“, because the discovered transformation converts shear diagrams of any form into those with an asymptotic character.

In addition to the cohesion and internal friction coefficients the reduced shear diagram shows also the structural change constant of the soil and enables so a more exact description of the soil than so far.

Moreover, the introduction of the reduced shear diagram permits a generalization of the formula of the circumferential force for all kinds of soil which, as is well-known, was not possible up to now.

György Komándi: „Détermination des coefficients physiques du sol en fonction des rapports entre le diagramme de cisaillement et la courbe de l'effort de traction.“

L'auteur est d'avis que l'on ne doit pas négliger le caractère du diagramme de cisaillement du sol quand on détermine mathématiquement la force circonférentielle.

L'auteur a donc examiné le rapport entre le diagramme de cisaillement et la courbe de l'effort de traction et en a déduit la transformation qui existe entre ces deux facteurs. Sur la base du rapport fonctionnel ainsi trouvé, il a élaboré une méthode qui permet de déterminer à partir de la courbe de l'effort de traction du tracteur le diagramme de cisaillement et les coefficients physiques du sol. Il a désigné le diagramme de cisaillement ainsi déterminé un „diagramme de cisaillement réduit“, étant donné que la transformation révélée transforme les diagrammes de cisaillement de toute forme en des diagrammes à caractère asymptotique.

Le „diagramme de cisaillement réduit“ permet de déterminer non seulement la cohésion et le coefficient de frottement interne du sol, mais également la constante des variations de forme et par conséquent une description plus précise du sol.

L'utilisation du diagramme de cisaillement réduit permet en outre l'application généralisée de la formule de la force circonférentielle à tous les types de sol, ce qui n'a pas été possible jusqu'ici.

Technische Dokumentation unentbehrlich

Dokumentation und Information werden bei dem raschen Fortschritt der Technik und der immer komplizierteren und engeren Zusammenarbeit der Ingenieure in der ganzen Welt immer notwendiger. Auf dem Deutschen Ingenieurtag 1966 vom 16. bis 18. Mai in Berlin werden in einer der 17 Vortragsgruppen die technisch-wissenschaftliche Information des Ingenieurs, die Analyse von Dokumenten auf system-theoretischer Grundlage, die Informationsverarbeitung in einer Erfahrungswissenschaft und die Möglichkeiten und Mittel der Patentdokumentation behandelt werden. (VDI)

*

Sowjetisches Patentrecht

VON IVAR GERHARD GRAVE. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1966. 118 Seiten, 2 Bilder. DIN A 5. Preis: kart. 22,00 DM.

Das formelle und das materielle Recht sowjetischer Patentanmeldungen und der Patente in der UdSSR unter Berücksichtigung der Stellung der ausländischen Patentanmelder behandelt das Buch „Sowjetisches Patentrecht“ von Patentanwalt Dipl.-Phys. IVAR GERHARD GRAVE.

Dieses Buch untersucht kritisch neuestes sowjetisches Schrifttum, das aus zahlreichen Zeitschriften zusammengetragen worden ist. Die UdSSR ist seit dem 1.7.1965 Mitglied der Pariser Verbands-Übereinkunft (PVU). In dem vorliegenden Buch werden die PVU-Verordnungen mit nationalem sowjetischem Recht verglichen. Ferner beschäftigt es sich mit der geschichtlichen Entwicklung des Erfinderschutzes und des Patents in der Sowjetunion, dem Urheberschein, dem Anmeldeverfahren, den sowjetischen Patentansprüchen im Erteilungsverfahren, dem Recht aus dem Patent und mit dem Lizenzvertrag.

Das vor allem für Industrieunternehmen interessante Buch setzt die Reihe der patentrechtlichen Veröffentlichungen des VDI-Verlages fort, der im vergangenen Jahr unter anderem das Buch von Dr.-Ing. ARNO SCHMIDT „Was der Ingenieur vom gewerblichen Rechtsschutz wissen muß“ herausgebracht hat.

György Komándi: „Determinación de los valores índice físicos del terreno por las relaciones entre el diagrama de corte y la característica del esfuerzo de tracción.“

Para la determinación de la fuerza circunferencial el autor opina que no debe perderse de vista el diagrama de corte del suelo.

Por esto se ha investigado la relación que existe entre el diagrama de corte y la característica del esfuerzo de tracción, deduciéndose la transformación que existe entre uno y otra. Fundándose en las relaciones funcionales, se ha buscado un método de calcular el diagrama de corte y los valores índice físicos del terreno, sirviéndose de la característica de tracción del tractor. El diagrama así encontrado, se ha llamado „diagrama de corte reducido“, ya que la transformación encontrada cambia los diagramas de corte de cualquiera forma en diagramas de carácter asintótico.

El diagrama de corte producido facilita además de la cohesión y del coeficiente de fricción interior la constante del cambio de forma del terreno, permitiendo así una descripción más precisa del suelo. Permite además generalizar la fórmula del esfuerzo circunferencial para todas clases de terreno, lo que hasta ahora no era posible.