

examinado está en condiciones de elevar aperos con centro de gravedad conocido. El procedimiento empleado por el campo de ensayos no da esta posibilidad. No considera el tractor y el dispositivo montado como unidad, sino que determina los esfuerzos de elevación, limitándose estrechamente a los puntos de vista que da la mecánica del tractor, desmontando la conducción superior de la suspensión en tres puntos, decisiva para la elevación, antes de efectuar la medición. Tales indicaciones sobre la fuerza elevadora no tienen valor alguno para el fabricante de los dispositivos, pues puede fundarse exclusivamente en sus propias apreciaciones.

Se ha hecho la proposición de comprobar, en combinación con el procedimiento seguido por algunos fabricantes de tractores, las cargas de elevación admisibles en vez de las fuerzas de elevación, entendiéndose como cargas admisibles las que pueden elevarse, tomando como punto de ataque el centro de gravedad del dispositivo, encontrándose el varillaje de suspensión ajustado en su posición más favorable. Este procedimiento de ensayo podría ejecutarse, empleando acoplamientos convenientes, sin trabajo excesivo. Los datos que facilitarían las pruebas, darían a conocer la conveniencia de la instalación del gato mecánico para el trabajo práctico.

Mieczyslaw Gregory Bekker:

## Die Mechanik der Geländefahrt

Der vorliegende Beitrag bringt Auszüge aus der am 13. November 1962 vor der Institution of Mechanical Engineers, Automobile Division, in London gehaltenen "James Clayton Lecture".

In freier Übersetzung wurde dieses Referat auf dem „Colloquium der Geländefahrt“, einer Gemeinschaftsveranstaltung der Fakultät für Bauwesen und der Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Hochschule München, am 22. November 1962 vorgetragen.

Am 27. November 1962 schloß sich ein weiteres Referat des Verfassers auf einer Gemeinschaftsveranstaltung der Deutschen Gruppe der „International Society for Terrain-Vehicle-Systems“ mit den VDI-Fachgruppen Fahrzeugtechnik (ATG) und Landtechnik in Bonn an.

Die Geschichte der Forschung auf dem Gebiet der Geländefahrt ist noch nicht geschrieben. Dies ist in erster Linie eine Folge der weit verstreuten und in verschiedenen Sprachen erschienenen Veröffentlichungen [1 . . . 4; dort weitere Literatur]. Deshalb sei ein kurzer Rückblick auf die wichtigsten Beiträge der letzten fünfzig Jahre gestattet.

Es wäre unmöglich, mit einem solchen Rückblick zu beginnen, ohne an erster Stelle RUDOLF BERNSTEIN zu erwähnen [5]. Seine Arbeit über starre Räder wurde 1913 veröffentlicht. Sie wurde durch russische Landmaschineningenieure in den dreißiger Jahren umfassend weiterentwickelt [6]. Obwohl durch andere völlig ignoriert oder falsch zitiert, war sie der erste Schritt in der Behandlung der Beziehungen zwischen Boden und Fahrzeug in der klassischen Art der angewandten Mechanik.

Die Lösung beruhte jedoch auf vereinfachenden Annahmen, darunter derjenigen, daß der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung des Bodens von Wirkungen der Größe und der

Form der Auflagefläche abhängig sei. So konnten die gefundenen Gleichungen nicht verallgemeinert werden. Für viele Jahre verhinderte dies die Entwicklung einer allgemeinen Theorie der Fortbewegung, da diese eine allgemeine Behandlung in Gestalt der Spannungs-Dehnungs-Funktion des Bodens verlangt.

BERNSTEIN behandelte ausschließlich gezogene Räder, das heißt also Fahrwiderstand und Spurbildung; es war keine Lösung für die Schubkraft, für den Radvortrieb, vorgesehen. Infolgedessen fehlte gänzlich die Basis für eine Mechanik der Fahrzeuge mit eigenem Antrieb.

Dies ändert sich erst 1944, als E. W. E. MICKLETHWAITE seine grundsätzliche Abhandlung über Bodenmechanik und Kampffahrzeuge schrieb [7]. Er war der erste, der die Schlußfolgerung veröffentlichte, daß die größte Vortriebskraft eines Fahrzeuges in der Form der COULOMBSchen Gleichung für die größte Scherfestigkeit von Böden ausgedrückt werden kann. Er führte auch TERZAGHIS Lösung für die Tragfähigkeit eines Bodens als ein Mittel für die Berechnung der Spurbildung von Fahrzeugen ein [8].

Die grundsätzliche Wichtigkeit der Arbeit von MICKLETHWAITE, besonders seiner Gleichung der Vortriebskraft, wurde wieder allgemein übersehen.

Eine bemerkenswerte Ausnahme bildete die Arbeit der Operations Research Group des britischen Versorgungsministeriums, die das Problem der Fortbewegung während und kurz nach dem Zweiten Weltkrieg studierte. Ihre ausgezeichneten Veröffentlichungen waren gegenüber BERNSTEINs durch die Benutzung von Methoden und Annahmen aus der bautechnischen Bodenmechanik bereichert.

Dies allerdings mag ihr schwacher Punkt gewesen sein; denn Bauingenieure haben es in erster Linie mit sehr langsamen und kleinen Veränderungen des Baugrundes unter der Wirkung von ausgedehnten Belastungsflächen zu tun, während Fahrzeugingenieure sich mit schnelleren und großen Formänderungen befassen müssen, die die Folge von relativ kleinen Druckflächen wie bei Ketten und Rädern sind; für sie existierte zu dieser Zeit noch keine für die Fahrzeugbewegung brauchbare Lehre der Bodenmechanik.

BERNSTEIN und MICKLETHWAITE hatten grundsätzliche Methoden für die Lösung zweier verschiedener Seiten des Problems gezeigt, nämlich des Bewegungswiderstandes und der maximalen Schubkraft. Was fehlte, war dann die Verallgemeinerung und die Verbindung beider Systeme von Gleichungen in einer umfassenden Theorie. Dies konnte erst gemacht werden, nachdem die Dehnungs-Spannungs-Funktionen des Bodens unabhängig gemacht worden waren von der Größe und der Form der Druckfläche, zumindest für praktische Zwecke.

Das war das Endziel meiner Arbeit in Kanada seit 1944: Eine systematische Analyse und Synthese von Versuchsergebnissen ebenso wie die Aufstellung einer umfassenden Theorie und nicht so sehr die Lösung eines speziellen Problems.

Meine Arbeit hat die Annahme von MICKLETHWAITE bestätigt, daß die größte Scherfestigkeit oder die größte Schubkraft je Flächeneinheit  $\tau_{max}$ , die auf dem Boden erreichbar ist, für praktische Zwecke durch die COULOMBSche Gleichung  $\tau_{max} = c + p \tan \varphi$  ausgedrückt werden kann. Sie wurde zu der in Bild 1 gezeigten erweitert; diese Gleichung ist allgemein und bezieht sich auf ein

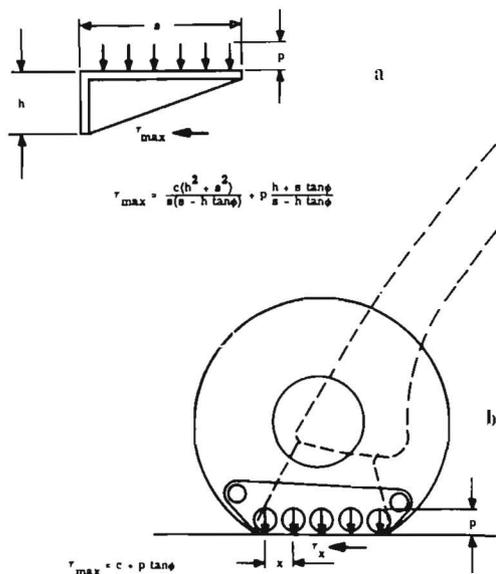


Bild 1: Gleichung der maximalen Schubspannung  $\tau_{max}$  für verschiedene Bodenberührungsflächen  
 $c$  = Schubspannung infolge Kohäsion;  $p$  = Flächenpressung;  
 $\varphi$  = Reibungswinkel

Kettenglied mit Greifer (Bild 1a) oder eine Berührungsfläche einer Kette, eines Fußes, eines Reifens oder eines starren Rades auf nachgiebigem Boden (Bild 1b).

Die Bodenwerte  $c$  und  $\varphi$  wurden in diesen Studien als empirische Werte aufgefaßt, die durch den sogenannten Scher-Test unter Bedingungen bestimmt werden, die die Bodenschichtung unter einem Rad, einer Kette oder einem Fuß (Bild 1b) nachahmen.

Meine folgenden Studien bei dem Stevens Institute of Technology in Chicago führten zu einer Ausdehnung der Theorie der Mechanik der Fahrzeugbewegung auf das Festigkeitsproblem. Ebenso wurde ein erster Versuch zur Lösung des Plastizitätsproblems im Hinblick auf die Beziehungen zwischen Schubkraft und Schlupf gemacht. Zu diesem Zweck wurde die COULOMBSche Gleichung verallgemeinert, um nicht nur das Maximum, sondern auch den Verlauf der Scherfestigkeit oder der Schubspannung  $\tau_x$  im Boden bei verschiedenem Schlupf  $i$  des Rades, der Kette oder des Fußes zu erhalten.

$$\tau_x = \frac{c + p \tan \varphi}{y} \left( e^{(-K_2 \cdot \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i x} - e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i x} \right).$$

Hierin sind  $K_1$  und  $K_2$  empirische Koeffizienten für einen gegebenen Bodentyp.  $x$  bedeutet den Abstand zwischen dem Beginn der Bodenberührungsfläche und dem Punkt, in dem  $\tau_x$  gemessen wird (siehe Bild 1b),  $y$  ist der Maximalwert der in Klammern stehenden  $e$ -Funktion.

Diese ergab die erste Verallgemeinerung der Spannungs-Dehnungsbeziehung, die für die Schubkraft verantwortlich ist, und führte zu weitreichenden Schlußfolgerungen über die Eignung von Ketten und Rädern und die Beziehungen zwischen Größe und Form der Druckfläche [9].

1951 fehlte immer noch die Lösung des Plastizitätsproblems für das Einsinken und den Fahrwiderstand; eine solche Aufgabe schien ein äußerst schwieriges Unternehmen zu sein. Um sie zu lösen, begann ich zunächst mit der Gleichung von BERNSTEIN für die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen:

$$p = kz$$

und ging später zu der durch GORIATSKIN [6] weiterentwickelten Gleichung über:

$$p = kz^n.$$

Hierin bedeuten  $p$  der Bodendruck,  $k$  der Beiwert der Bodenverformung,  $z$  die Einsinktiefe und  $n$  ihr empirischer Exponent. Diese Gleichung basierte auf zahlreichen Versuchen von anderen Forschern, die Spannungs-Dehnungsbeziehung für Stoffe zu finden, die nicht dem HOOKESchen Gesetz folgen. Es war faszinierend zu sehen, wie viele dies schon vorher versucht hatten. Um nur einige wenige illustre Namen zu nennen, seien BACH, FÖPPL, HODGKINSON, COX und VON LANG erwähnt [10]. In all diesen Lösungen bedeutete jedoch der Verformungsbeiwert  $k$  nicht einen allgemeinen Bodenwert, der vom Boden allein abhängt, er war auch eine undefinierte Funktion der Form und Größe der Aufstandsfläche. Dies trifft voll zu für BERNSTEIN und GORIATSKIN.

Das Studium dieses Problems während meiner Arbeit an der Johns Hopkins University (1952—1954) hat mich jedoch entdecken lassen, daß beim Bauwesen die folgende empirische Gleichung für eine geringe Einsinktiefe  $z$  und eine große Druckfläche mit der Breite  $b$  benutzt worden ist [11]:

$$p = \left( \frac{k_r}{b} + k_q \right) z.$$

Hierbei sind  $k_r$  und  $k_q$  die Verformungs-Koeffizienten der Kohäsion beziehungsweise der Reibung.

Es war unverkennbar, daß diese Gleichung eine Form der vorerwähnten Gleichung ist und daß sie in verallgemeinerter Form übergeführt werden kann in:

$$p = \left( \frac{k_r}{b} + k_q \right) z^n.$$

Augenscheinlich waren die Koeffizienten  $k_r$  und  $k_q$  jener Gleichung für praktische Zwecke unabhängig von der Form und Größe der Belastungsfläche; dies konnte auch für diese Gleichung erwartet werden. Die Übereinstimmung zwischen der Rechnung

und denjenigen Versuchsergebnissen, die in der Literatur des Bauwesens erreichbar waren, war völlig überzeugend, soweit sie sich auf das Einsinken von belasteten Platten bezogen. Die Wiedergabe der Spannungs-Dehnungs-Funktion durch die letzte Gleichung mag daher als eine Basis für die Ermittlung des Bewegungswiderstandes und der Einsinktiefe dienen.

1954 wurde ich vom Detroit Arsenal zur Mitarbeit an der Errichtung eines Land Locomotion Laboratory hinzugezogen. Das Sechsjahres-Programm dieses Laboratoriums war gewidmet: Der praktischen Nachprüfung des neuen Systems von Bodenwerten [12], dargestellt durch die diskutierten Spannungs-Dehnungs-Funktionen, und der Entwicklung von mathematischen Modellen der Beziehungen zwischen Boden und Fahrzeug innerhalb eines vereinheitlichten Begriffssystems der Boden-Fahrzeug-Mechanik.

Das Studium wurde auf das Problem der Fahrzeug-Stabilität — bezogen auf die Geometrie der Geländeoberfläche — ausgedehnt. Dieses Studium wurde durchgeführt in Übereinstimmung mit Ideen, die zuerst 1948 geäußert worden sind [13] und ausgedehnt durch die Anwendung von statistischen Methoden für die verallgemeinerte harmonische Analyse [14].

In diesen Studien reifte auch die Erkenntnis, daß die Berechnung des Systems Gelände-Fahrzeug ihrer Natur nach statistisch sein muß, da auch die Bodenwerte mit dem Wetter-Rhythmus und der Geographie nach einer statistischen Verteilung wechseln. Die vorläufige Methode der Auswahl der günstigsten Entwurfsparameter oder der Anwendbarkeitsbereiche für eine gewünschte Erfolgswahrscheinlichkeit und umgekehrt wurde zum ersten Mal quantitativ 1959 formuliert [15].

Die meisten dieser Arbeiten dienten als ein Leitfaden für die 1. Internationale Konferenz der Mechanik des Systems Boden-Fahrzeug, welche 1961 an der Technischen Hochschule Turin stattfand. Diese 1. Internationale Konferenz, die zur Gründung der International Society for Terrain-Vehicle Systems führte, hat ein langes Kapitel einer Forschung abgeschlossen, das ungefähr 1944 begonnen hat; sie hat ein neues Kapitel aufgeschlagen, welches hoffentlich zusätzlich Talente anziehen wird, die für die Weiterführung der Arbeit notwendig sind, die bis jetzt eher als ein bescheidener Beginn, denn als ein fortgeschrittenes Stadium einer Wissenschaft bezeichnet werden kann [16].

### Analyse und Synthese neuer Versuchsergebnisse

Nach diesem historischen Rückblick möchte ich die bisherigen Erkenntnisse kurz darlegen, die zu einer Basis für die derzeitige Tätigkeit einer beträchtlichen Zahl von Fachleuten geworden sind und die wir als Mechanik der Geländefahrt bezeichnen wollen.

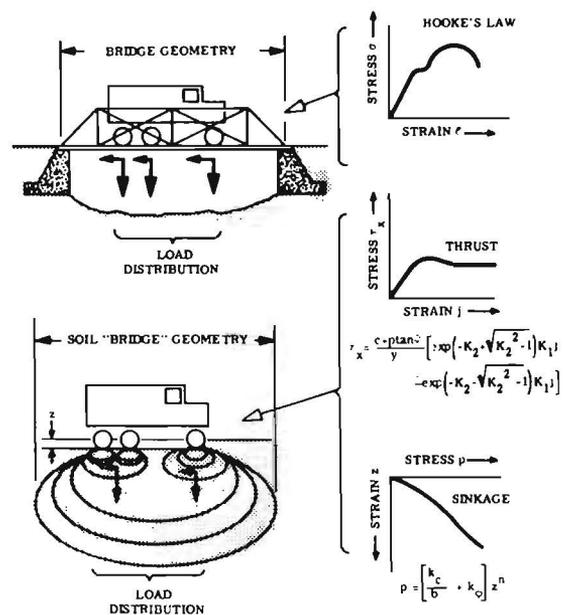


Bild 2: Spannungs-Dehnungs-Funktionen für Stahlbrücken und „Bodenbrücken“ (Die Formel für die Schubspannung  $\tau_x$  ist im Bild in amerikanischer Schreibweise wiedergegeben)

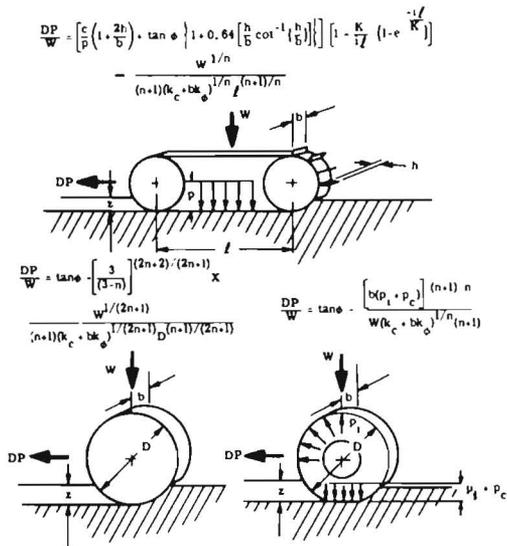


Bild 3: Zugkraftbelwert  $\frac{DP}{W}$  für Kette, starres Rad und Luftreifen

Die Probleme sind zweifach: Sie betreffen die Fähigkeit des Fahrzeuges, einerseits nachgiebigen Grund mit einer relativ glatten Oberfläche zu überschreiten und andererseits sich auf einem harten Grund mit einer rauen Oberfläche und großen Hindernissen zu bewegen.

Zur Erläuterung der ersten Gruppe von Problemen nehme man ein Fahrzeug an, das eine Stahlbrücke befährt (Bild 2). In diesem Fall ist die Hauptfrage aus der Sicht der Geländefahrt diejenige, ob die Brücke fest genug ist, die Last zu tragen, oder ob sie sich über die Sicherheitsgrenze hinaus durchbiegen wird. Eine Antwort kann in bekannten Gleichungen gefunden werden, wenn die Geometrie der Brücke, die Lastverteilung und die Spannungs-Dehnungs-Funktion des Werkstoffes der Brücke bekannt sind. Für Stahl im elastischen Bereich ist der Elastizitäts-Modul innerhalb des HOOKESCHEN Gesetzes die einzige Funktion, die notwendig ist, das Problem zu lösen.

Bei der Überschreitung von nachgiebigem Boden bildet der Boden, der das Fahrzeug trägt, ebenfalls eine Art von Brücke und die Frage ist wiederum die, ob sie das Fahrzeug ohne unzulässige Verformung hinsichtlich Spurtiefe und Schlupf tragen kann. Ein

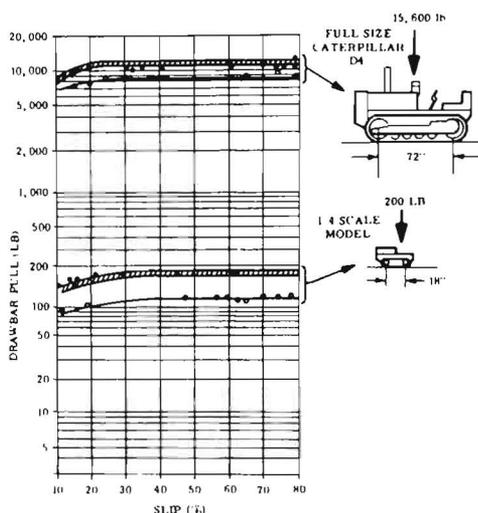


Bild 4: Berechnete und in der Bodenrinne gemessene Zugkräfte in Abhängigkeit vom Schlupf für Kettenschlepper in natürlicher und auf ein Viertel verkleinerter Größe

berechnet für sandigen Lehm für zwei Standard-Abweichungen von gemessenen Boden-Kenngrößen:

.....	berechnet für trockenen Sand;
	gemessene Werte
Sand:	$k_c = 0,05$ ; $k_\phi = 3,58$ ; $\mu = 1,18$
	$c = 0,1$ ; $\phi = 28^\circ$ ; $K = 0,31$
Sandiger Lehm:	$k_c = 8,6 - 11,1$ ; $k_\phi = 4,85 - 6,46$
	$\mu = 0,68 - 0,78$ ; $c = 0,25 - 0,34$
	$\phi = 35,5^\circ - 37^\circ$ ; $K = 0,1$
	(nach Wm. L. Harrison jr.)

solches Problem kann ebenfalls gelöst werden, wenn die Geometrie der Brücke, die Lastverteilung und die erforderliche Spannungs-Dehnungs-Funktion bekannt sind. Die Druckverteilung im Boden ist vor längerer Zeit durch die Bodenmechanik angenähert bestimmt worden [18]. Die früher beschriebenen Spannungs-Dehnungs-Funktionen sind jüngst eingeführt worden, eine für die Schubkraft, die andere für die Einsinktiefe (Bild 2 rechts).

Dementsprechend ist die Lösung möglich geworden, wenn man ähnliche Gleichungen wie bei der Berechnung der Formänderung einer Stahlbrücke bildet. Solche sind in einer vorläufigen Form für viele Entwurfs- und Ausführungs-Parameter durch mich und meine Mitarbeiter aufgestellt worden. Ihre praktische Brauchbarkeit und ihre Grenzen sind in vielen Veröffentlichungen diskutiert worden [1; 2; 15. 18 . . . 23]. Jedoch mag es interessant sein, solche Lösungen in einer verallgemeinerten Form zu zeigen. Einige Beispiele mögen hier genügen. Diese beziehen sich auf den allgemeinsten Ausdruck für irgendeine Art von Ortsveränderung in der Luft, auf der See oder dem Land, d. h. hinsichtlich des Verhältnisses Bewegungswiderstand zu Auftrieb. In der Fahrzeug- und Landtechnik spricht man stattdessen vom Verhältnis der Zugkraft zu Gewicht beziehungsweise vom Zugkraftbeiwert  $DP/W$ . Bild 3 zeigt geeignete Gleichungen für eine Kette, ein starres Rad und einen Luftreifen.

Andere Beziehungen für die Vortriebsleistung, die Geschwindigkeit, den Kraftstoffverbrauch und/oder für Entwurfsparameter, wie Flächenpressung, Typ des Fahrgetriebes, Zahl der Räder oder Ketten, Reifendruck, Durchmesser, Breite und Länge der Fahrzeugelemente, Gesamtaufbau usw., können direkt von unseren Gleichungen hergeleitet werden. Dies ist bereits in weitem Ausmaß geschehen.

Damit erhalten Konstrukteure und Käufer ein Mittel zur quantitativen Voraussage der Einflussfaktoren und des Fahrzeug-Verhaltens. Es mag noch primitiv sein, ist aber besser als gar nichts.

#### Wie genau sind die Voraussagen?

Die Antwort auf diese Frage findet sich auf den Bildern 4 und 5. Bild 4 zeigt einen Raupenschlepper, der in einer Bodenrinne zusammen mit seinem Modell im Maßstab 1 : 4 geprüft worden ist. Die berechnete Zugkraft ist in Abhängigkeit vom Schlupf in dem schraffierten Band dargestellt, dessen Grenzkurven 90% der gemessenen Bodenwerte berücksichtigen. Im trockenen Sand, welcher leichter aufzubereiten und dessen Struktur deshalb gleichmäßiger ist, fallen die berechneten Werte auf eine Linie; tatsächlich gemessene Werte der Zugkraft sind mit Punkten oder Kreisen wiedergegeben. Die Übereinstimmung zwischen den vorausgerechneten und den gemessenen Werten ist gut. Dies gilt sowohl für ein Fahrzeug mit einem Gewicht von 7 t (15600 lb) als auch für sein Modell mit rund 90 kg (200 lb) Gewicht.

In Bild 5 sind die Ergebnisse für einen Traktor mit etwa 1800 kg Gewicht und sein Modell mit 112 kg wiedergegeben. Die Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Experiment ist aus-

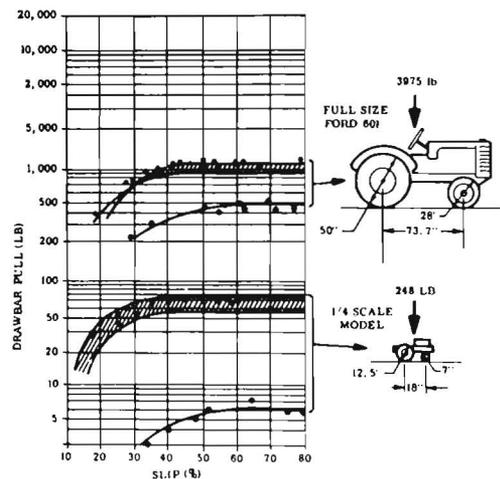


Bild 5: Berechnete und in der Bodenrinne gemessene Zugkräfte in Abhängigkeit vom Schlupf für Radschlepper in natürlicher und auf ein Viertel verkleinerter Größe

Legende und Anmerkungen siehe Bild 4

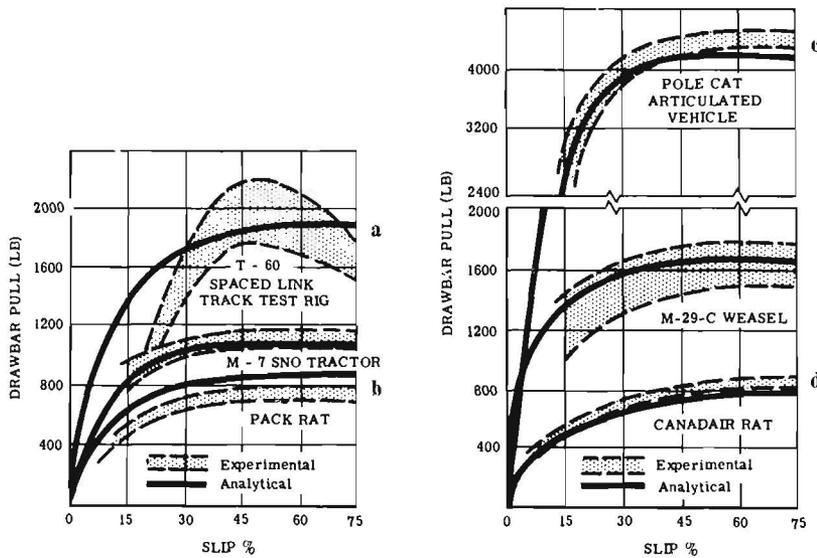


Bild 6: Genauigkeit der Zugkraft-Vorausrechnung bei Feldinsatz von Kettenschleppern

gezeichnet. Die hier gezeigten Resultate gelten für kontrollierte Laboratoriumsbedingungen.

Auf dem Felde kann jedoch dieselbe Genauigkeit erreicht werden, besonders für gleichmäßig belastete Ketten, wie sie an landwirtschaftlichen Kettenschleppern oder anderen gut entworfenen Standardfahrzeugen verwendet werden. Allerdings setzt dies voraus, daß die Bodeneigenschaften nicht über Entfernungen wechseln, die vergleichbar mit den linearen Abmessungen des Fahrzeuges sind. Die Bilder 6a und b zeigen Ergebnisse, die im Feld auf einigermaßen gleichmäßigen Böden erzielt wurden. Die Abweichung zwischen Vorhersage und Experiment, die in Bild 6a bei niederen Schlupfwerten sichtbar ist, ist begründet durch die Tatsache, daß das Versuchsfahrzeug mit einer aufgelösten Gliederkette ausgerüstet war, während die Berechnung sich auf eine Gleichung für eine konventionell geschlossene Kette stützte. Dies ist inzwischen teilweise korrigiert worden [2]. Die Abweichung in Bild 6b war durch die Vernachlässigung eines abnormen Zwischenraumes der Laufrollen in unseren Gleichungen verursacht. Passende Korrekturen sind dann gemacht worden. In den Fällen c und d sind die Unterschiede zwischen Vorhersage und Experiment durch die Tatsache bedingt, daß keine üblichen Fahrzeuge verwendet wurden, auf welchen unsere Gleichungen basierten, sondern daß sie mit Knicklenkung ausgeführt waren; sie waren also aus zwei getrennt angetriebenen Einheiten zusammengesetzt, die durch ein bewegliches Gelenk miteinander verbunden waren. Auch dies ist inzwischen mit gutem Erfolg geklärt worden.

Die vorausgegangenen Beispiele zeigen, wie viele und wie unterschiedliche Entwurfsparameter in theoretischen Voraussagen betrachtet werden können. Sie zeigen auch, daß eine Verbesserung der Theorie in vielen Fällen notwendig ist, damit Voraussagen zuverlässiger gemacht werden können. In nicht gleichmäßigem Boden und/oder auf großen Flächen, innerhalb derer die Bodenwerte sehr variieren, können Angaben über Leistung oder über Entwurfsparameter nur im Rahmen von Wahrscheinlichkeits-Verteilungen gemacht werden, die auf gewünschten oder in praktischen Grenzen möglichen Vertrauensbereichen aufbaut. Da ein solches Verfahren die letzte Lösung des Problems der Bewegung abseits der Straße darstellt, will ich kurz hierauf eingehen.

Bodenwerte sind definierte Funktionen des Feuchtigkeitsgehalts für einen gegebenen Geländetyp. Diese Abhängigkeiten können entweder auf dem Feld oder unter simulierten Laborbedingungen bestimmt werden, wie mit hoher Zuverlässigkeit bewiesen [15]. Andererseits ist es entweder durch direkte Beobachtung oder durch meteorologische Vorhersagen möglich, die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der ein bestimmter Feuchtigkeitsgehalt in einem gegebenen Gelände eintreten wird. Folglich kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Gruppierung von Bodenwerten ermittelt werden, die mit einem gegebenen Feuchtigkeitsgehalt korrespondiert. Da die Bodenwerte mit der Feuchtigkeit stetig (monoton) abnehmen, kann die Wahr-

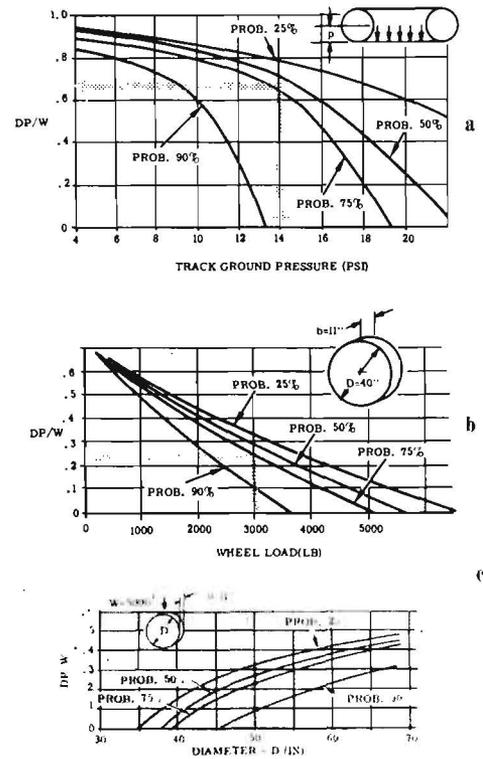


Bild 7: Wahrscheinlichkeit für das Erreichen bestimmter Zugkraftbeiwerte für den Boden gemäß Bild 8

a) bei verschiedener Bodenpressung unter Ketten; b) bei verschiedener Radlast; c) bei verschiedenem Raddurchmesser

lichkeit berechnet werden, mit der eine gegebene Leistung bei bestimmten Bodenwerten erreicht werden kann und umgekehrt.

Ergebnisse für einen typischen Boden sind in Bild 7a eingezeichnet. Sie gestatten die Wahl des zulässigen Bodendrucks  $p$ , mit dem ein bestimmtes Verhältnis von Zugkraft zu Gewicht mit der Wahrscheinlichkeit von 90, 75, 50 oder 25% erreicht werden soll. Wünscht man zum Beispiel mit einer Erfolgsaussicht von 75% in einem Bereich des Zugkraftbeiwertes von 0,65 zu operieren, dann muß man einen Traktor mit einer Bodenpressung von nicht mehr als 14 psi (angenähert  $1,0 \text{ kg/cm}^2$ ) wählen. Bild 7b zeigt, welche Zugkraft man für unterschiedliche Lasten und Wahrscheinlichkeiten für ein Rad mit 40" (rund 1 m) Durchmesser und 11" (27,5 cm) Breite erhalten wird. Wenn das Rad beispielsweise mit 3000 lb belastet ist und die Erfolgsaussicht 75% sein soll, dann beträgt der erreichbare Zugkraftbeiwert ungefähr 0,25.

Bild 7c zeigt, welcher Raddurchmesser  $D$  bei einer Breite von 11" und einer Last von 5000 lb gewählt werden muß. Für einen Zugkraftbeiwert von beispielsweise 0,32 mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 25% kann ein Rad mit 50" Durchmesser gewählt werden. Die diskutierte Methode gestattet so die Vorhersage der Leistungsfähigkeit und der Wahrscheinlichkeit anhand der Entwurfsparameter und umgekehrt. In den oben dargestellten Beispielen entsprechen die Beziehungen zwischen den Bodenwerten

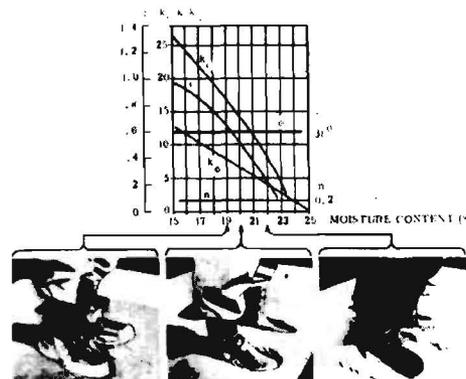


Bild 8: Bodenkenngrößen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit

und dem Feuchtigkeitsgehalt dem Bild 8. Es zeigt das Einsinken der Füße eines Mannes bei nur wenig unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt in einem bestimmten Boden bei 19, 20 und 22% Feuchtigkeit. Für die Verteilung der zeitlichen Feuchtigkeitsschwankungen in dem betrachteten Gebiet ist unterstellt worden, daß sie einer Normalverteilung entsprechen.

Auf die Frage nach der Genauigkeit solcher Vorhersagen kann man folgende Antwort geben: Die Genauigkeit wird nicht durch die mathematische Behandlung des Problems mit Hilfe der Wahrscheinlichkeits-Theorie beeinträchtigt, wenn die Bodenwerte variabel in Raum und/oder Zeit und nicht konstant sind.

Der Vertrauensbereich solcher Vorhersagen hängt von der Stichprobentechnik ab, die man für die Geländeaufnahme anwendet. Man könnte darauf hinweisen, daß Vorhersagen, die auf ähnlichen Untersuchungen und auf statistischer Abschätzung beruhen, erfolgreich in vielen Bereichen durchgeführt werden. Sie sind die Grundlage der Sicherheit beispielsweise beim Entwurf von Flugzeugen. Demgemäß scheint kaum ein Zweifel zu bestehen, daß diese Methode genügend zuverlässig im Hinblick auf eine langfristige Entwicklung und auf die Tendenzen in der Geländefahrt gefunden werden wird. Ein guter Anfang in dieser Richtung ist bereits gemacht.

Ich kann mir zum Beispiel vorstellen, daß in einer nicht zu fernen Zukunft alle in Frage kommenden Böden durchgemessen sind, so daß man die Gesamtwahrscheinlichkeit für das Erreichen einer gewünschten Leistung abschätzen kann. Nur dann wird man Fahrzeuge auswählen können, die mit einem gewünschten Maß von Erfolgsaussichten bei tragbaren Kosten arbeiten. Dies wird sich auf den Entwurf von Ackerschleppern auswirken, damit sie mit einer besseren Erfolgsaussicht in einem bestimmten geographischen Gebiet eingesetzt werden können als bisher.

Instrumente zur Messung der Bodenwerte im Feld und im Laboratorium, wie das „Bevameter“, sind ursprünglich durch das Land Locomotion Laboratory der U.S. Army entwickelt worden [2]. Sie sind seitdem in verschiedenen Ländern entweder eingeführt oder untersucht worden. Beschreibungen des Prinzips und/oder Entwurfsdetails sind in der internationalen Literatur zu finden [17; 23...31]. Ich möchte jedoch auf eine Ausführung des Bevameters hinweisen (Bild 9), die kürzlich für den Einsatz auf der Mondoberfläche entworfen und gebaut worden ist. Dieses Instrument wurde durch die General Motors Corporation für das Laboratorium für Strahl-Triebwerke des California Institute of Technology entwickelt; dieses Laboratorium arbeitet als Kontrahent für die National Aeronautics and Space Administration. Das Instrument besteht wie seine terrestrischen Vorgänger aus den Platten (1) und (2) und aus einem Scherring (3), welche dazu

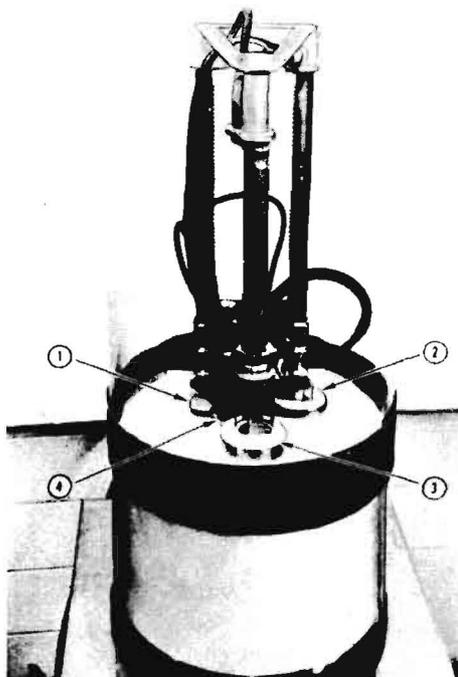


Bild 9: Bevameter zur Feststellung von Bodenkenngrößen auf dem Mond

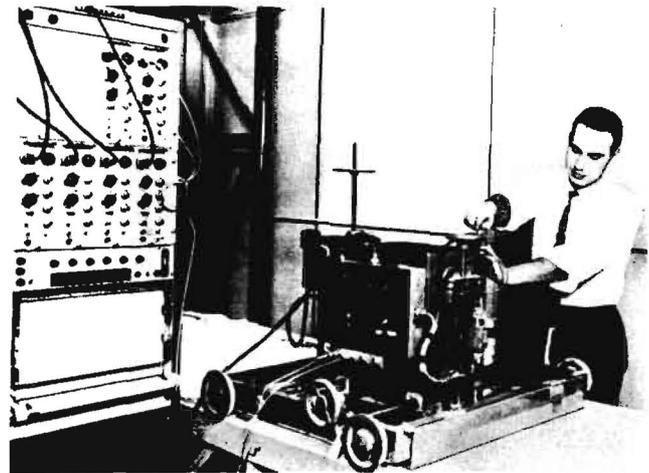


Bild 10: Bodenrinne mit Bevameter zur Erprobung von Mond-Modellfahrzeugen

dienen, die Kennwerte  $k_c$ ,  $k_\varphi$  und  $n$ , beziehungsweise  $c$  und  $\varphi$  zu bestimmen. Platte (4) wird als ein Fühlelement benutzt, um das Instrument gleich nach dem Landen des Raumschiffes auf der Mondoberfläche auszurichten. Der Vorgang ist selbstverständlich vollautomatisch, die Meßwerte werden zur Erde weitergegeben.

Bodenmessungen unter teilweise simulierten Bedingungen des Mondbodens sind in den General Motors Defense Research Laboratories durchgeführt worden. Bild 10 zeigt eine Bodenrinne, die mit Bimssteinstaub gefüllt und mit einem Bevameter ausgerüstet ist; hier sollen Aussagen über das Verhalten verschiedener Modelle von Mondfahrzeugen gewonnen werden. Drei mögliche Lösungen für solche Fahrzeuge sind im Bild 11 dargestellt.

Die beschriebene Erkundung der Mondoberfläche läuft parallel mit einer Arbeit, die in zunehmendem Maße für unseren Planeten wichtig wird. Sie umfaßt eine weitere Gruppe von Problemen der Fortbewegung, nämlich das Verhalten bei Schwingungen und die Fähigkeit von Fahrzeugen zur Überwindung von Hindernissen. Neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet haben zur Anwendung von neuen Methoden geführt. So wurde die harmonische Analyse auch für die statistische Erfassung der Fahrzeugreaktion auf eine beliebig verteilte Anregung durch die Geländeoberfläche verwendet [2; 14] und ein breites Studium der Überwindung von Hindernissen mittels kleiner Modellfahrzeuge eingeleitet [1; 32]. Obwohl der Fahrkomfort das höchste Ziel solcher Studien blieb, wurden die Maximierung der Geschwindigkeit durch die Verringerung der Nickschwingungen und besonders die Leichtigkeit der Überwindung von Hindernissen wichtig [2].

Dieses ist besonders bedeutsam für die Forschung an Mondfahrzeugen, bei der man bestrebt ist, alle logischerweise vorstellbaren Terrain-Bedingungen zu antizipieren und sich für alle Eventualitäten vorzubereiten.

Das auf Bild 12 gezeigte Modell eines Räderfahrzeuges für den Mond besteht aus drei angetriebenen Einheiten, die elastisch miteinander verbunden sind. Die größte Höhe eines senkrechten Hindernisses, welche ein solches Fahrzeug überwinden kann, kann durch eine Gleichung ausgedrückt werden, wie sie im Bild durch die Kurve auf der rechten Seite dargestellt ist.

Die experimentelle Bestätigung dieser Gleichung bei wirklichkeitsnaher Prüfung gestattet die Abschätzung von Änderungen solcher Versuchsparameter wie Achsabstand und Steifheit. Gliederzahl des Fahrzeuges, Reifendurchmesser usw. Ein ähnliches Studium, das auf die Überwindung eines Geländes mit sehr rauher Oberfläche gerichtet ist, gestattet es, die Probleme in Formeln auszudrücken und mathematische Modelle für das Verhalten von Fahrzeugen zu schaffen. Auf diese Art kann zum Beispiel der Energieverbrauch für verschiedene Fahrzeugformen und -bauarten abgeschätzt werden. Auch die theoretische Analyse der Lenkungsstabilität kann damit durchgeführt werden.

Studien der Fahrzeugschwingungen haben nicht nur die qualitativ bekannte Tatsache erhärtet, daß ein längeres Fahrzeug besser Spalten überbrücken und weicher und schneller fahren kann [1].

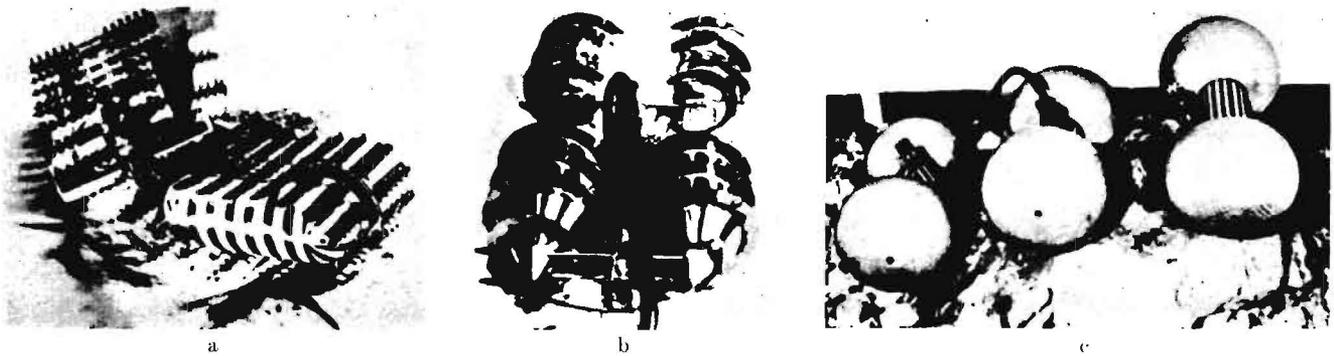


Bild 11: Modelle möglicher Mondfahrzeuge  
 a) Kettenfahrzeuge mit Knicklenkung; b) Schraubenfahrzeug; c) Gliederfahrzeug aus mehreren Einachseinheiten

sondern sie haben auch zu quantitativen Aussagen geführt, zum Beispiel über den möglichen Zuwachs an Fahrgeschwindigkeit mit der Vergrößerung seiner Länge als einer Funktion unterschiedlicher Entwurfparameter. Einfach ausgedrückt: Man kann heftige Nickbewegungen eines kurzen Fahrzeuges dadurch beheben, daß man es so lang wie möglich macht. Dies hat wieder einmal die schon bekannte Tatsache bestätigt, daß letzten Endes eher die Gestalt eines Fahrzeuges die Geschwindigkeit begrenzt als seine Federung [1; 2].

Im Zusammenspiel dieser diskutierten Methoden ist eine Reihe von praktischen Problemen gelöst worden. Es sollen nur einige der wichtigsten und instruktivsten erwähnt werden, die für die Abschätzung der Beweglichkeit im Gelände quantitativ durchgearbeitet worden sind:

Die Zugkraft eines Traktors, oder allgemein gesprochen eines Fahrzeuges, wächst mit dem Fahrzeuggewicht nur auf Reibungsböden, also auf sandigen Böden. Auf reibungslosen plastischen Böden, wie zum Beispiel gesättigtem Ton oder nassem Schnee, kann die Zugkraft nur erhöht werden durch die Vergrößerung der Bodenberührungsfläche, das heißt also der Ketten und Räder.

Die Gestalt der Bodenberührungsfläche und ihre Orientierung zur Fahrtrichtung sind ebenso wichtig für eine hohe Zugkraft und einen geringen Schlupf wie die Größe dieser Fläche und die Last. Schmale, lange Auflageflächen, folglich große, schmale Reifen und Ketten, sind in den meisten Fällen wirkungsvoller und beweglicher als breite, kurze Auflageflächen. Dies erklärt das bessere Verhalten von Einzelreifen gegenüber Zwillingreifen und hat zu einer neuen Reifenbauart geführt.

Eine große Elastizität des Reifenunterbaues ist zur Verbesserung der Leistung ebenso wichtig, wenn nicht sogar wichtiger als die Form des Reifenquerschnittes. Verringerung des Reifenluftdruckes kann nur so lange helfen, als damit die Bodenberührungsfläche vergrößert wird. Dies jedoch hängt nicht nur von der Last und der Reifengröße, sondern auch von den Bodeneigenschaften ab. Ein Reifen mit niedrigem Innendruck und hoher Einsenkungsmöglichkeit wird sich wie ein starres Rad verhalten, wenn der Boden seine kritische Weichheit erreicht hat.

Der Abstand der Laufräder an Kettenfahrzeugen sollte so klein wie möglich gehalten werden. Dies führt wiederum zu einem günstigen Verhältnis von Radgröße und Radzahl für eine gegebene Konstruktion.

Konventionelle Ketten, die aus einer fortlaufenden Kette von geschlossenen Platten bestehen, sind kein Allheilmittel für alle Geländebedingungen. In zahlreichen Fällen ergeben Ketten weit bessere Resultate, die aus breiten, in großem Abstand voneinander angeordneten Greifern bestehen, also die sogenannten aufgelösten Gliederketten. Stollen und Greifer sind praktisch unwirksam in homogenen, granulierten Böden.

Die Einsinktiefen eines Fahrzeuges hängt ebenso von der Form der Bodenberührungsfläche wie von der Bodenpressung ab.

Räder können Ketten in einem plastischen Boden mit geringer Reibung nicht ersetzen, außer sie besitzen eine im allgemeinen unannehmbare Größe.

Für jede Geländebedingung gibt es ein Optimum für Größe und Zahl der Räder. Es besteht eine quantitative Beziehung zwischen den Entwurfparametern und der Bauart des Fahrzeuges einerseits und den Geländebedingungen andererseits. Damit wird der Mythos des überall brauchbaren, universellen Fahrzeuges zerstört. Jeder Typ eines Fahrzeuges ist nur so gut wie seine statistische Anpassung an das Gelände, in dem es operiert.

Die obigen Feststellungen sind Illustrationen tatsächlicher Ausführungen. Obwohl früher einige dieser Informationen schon qualitativ bekannt waren, ist ihre wahre Bedeutung neu, da sie quantitative Merkmale der Einsatzverhältnisse widerspiegeln. Obwohl nur skizzenhaft und vorläufig, führt die gegenwärtige Kenntnis der physikalisch-geometrischen Beziehungen zwischen Fahrzeug und Gelände zu interessanten Schlußfolgerungen insofern, als vollkommen neue Konzeptionen für die Fahrzeuggestaltung gewonnen werden. Als Abschluß meines Vortrages will ich dieses Thema etwas ausführen.

Wenn man die Probleme der Fahrzeugbewegung über Land mehr von „hoher strategischer Warte“ aus als auf der Basis detaillierter taktischer Züge lösen will, dann wird die Frage nach dem Trend der Fahrzeugentwicklung in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren wichtiger als die Behandlung einzelner Komponenten.

Bevor man diese Frage zu beantworten versucht, mag es angemessen sein, eine Definition der sogenannten Fahrzeugkonzeption zu geben. Naturgemäß wird sie keine Entwurfsdetails des Motors, des Getriebes oder der Federung einschließen. Sie wird aber das Gesamtgebiet der Beziehungen zwischen Größe, Gestalt, Gewicht und Leistung umfassen. Dementsprechend wird die vorausgegangene Diskussion auf die Morphologie der Fahrzeuge und die grundsätzlichen Aspekte ihres Verhaltens ausgedehnt werden.

Der gegenwärtige Trend der Fahrzeugentwicklung kann eine „geometrische Evolution“ genannt werden. Bild 13 zeigt eine

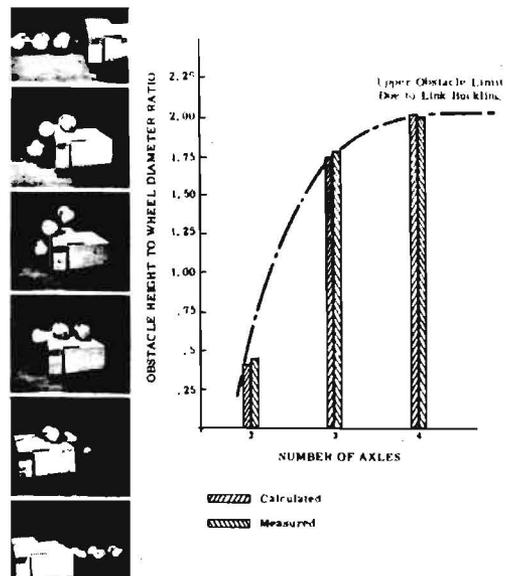


Bild 12: Von Gliederfahrzeugen überstiegbare Hindernishöhe in Abhängigkeit von der Achszahl

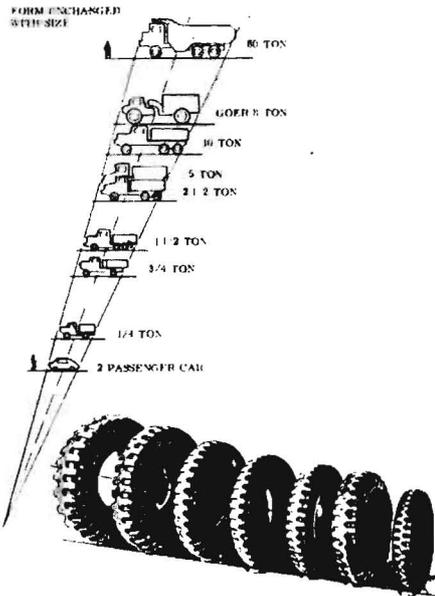


Bild 13: Morphologie der Motorfahrzeuge

Erläuterung dieses Begriffes. Die laufende Vergrößerung von Größe und Gewicht wird durch die Multiplikation aller Dimensionen eines Fahrzeuges mit praktisch dem gleichen Faktor erreicht. So ist die Gestalt sowohl eines kleinen als auch eines großen Fahrzeuges praktisch dieselbe. Die Größe scheint in genauer Übereinstimmung mit den Gesetzen der Perspektive zu wachsen, was sicher die Billigung von ALBRECHT DÜRER finden würde. Aber, wie schon d'ARCY WENTWORTH THOMPSON in seinem klassischen Werk "On Growth and Form" [33] für die belebte Welt ausgeführt hat: „Weil Wachstum ein etwas vages Wort für einen sehr komplexen Vorgang ist, verdient es in Beziehung zur Gestalt studiert zu werden“.

Dies ist voll anwendbar auf Kraftfahrzeuge. Daß das gegenwärtige Festhalten an den Beziehungen zwischen Abmessungen und Gestalt eines Fahrzeuges nicht zu großen Hoffnungen für künftige Entwicklungen berechtigt, ist schon anderwärts gezeigt worden [1; 2]. Die Dinge können nicht unendlich wachsen, auch nicht die Fahrzeuge; sie sind in der Tat bereits zu groß geworden. Die kritische Größe für ein wirkungsvolles, konventionelles Fahrzeug, das für die Geländefahrt bestimmt ist, kann auf etwa 100000 lb geschätzt werden. Solch eine Wachstumsbeschränkung der einmal gegebenen Form eines Fahrzeuges ergibt sich aus dem Anwachsen des Gewichtes mit der dritten Potenz seiner linearen Dimensionen, während die Bodenauffläche nur mit dem

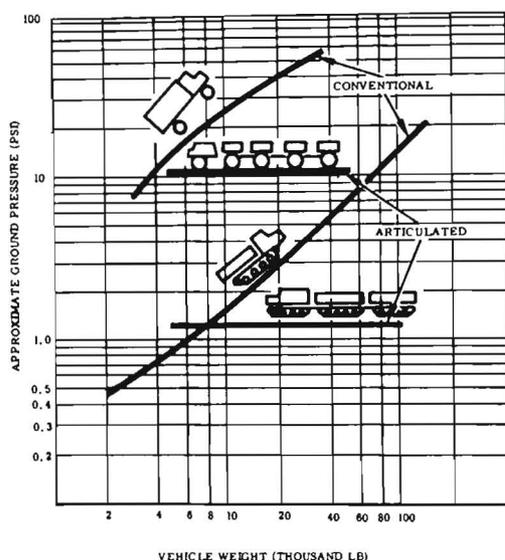


Bild 14: Bodendrucke und Fahrzeuggewichte bei gegliederten und starren Fahrzeugen

Quadrat der Abmessungen wächst. Hier liegt der Grund dafür, daß schwere Fahrzeuge eine größere Bodenpressung aufweisen als leichte.

Dieser Nachteil des gegenwärtigen geometrischen Trends ist direkt von unseren Gleichungen abgeleitet worden [1; 2; 25]. Diese haben ferner gezeigt, daß die Breite und die Länge der Bodenauffläche nicht dieselbe Wirkung auf die Verbesserung der Beweglichkeit haben. Da die Länge in die Formel mit einem höheren Gewicht eingeht als die Breite, bringt augenscheinlich die Vergrößerung der Länge mehr Gewinn als die der Breite.

Dies wird durch das bis jetzt noch nicht erwähnte Phänomen des "bulldozing resistance" betont [1; 2], einen Begriff, den man vielleicht am besten mit „Schiebewiderstand“ übersetzen könnte. Dieser Widerstand tritt dann auf, wenn das Laufwerk eines Fahrzeuges ähnlich einem Räumerschilde Erde vor sich herschiebt. Vorläufige Gleichungen haben die Größe dieses Widerstandes bei breiten Auflageflächen erkennen lassen, der die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeuges verschlechtert. Hiervon ist wieder abgeleitet worden, daß eine Vergrößerung der Länge der Vergrößerung der Breite sehr vorzuziehen ist. Eine große Breite ist ferner außerordentlich ungünstig, wenn schmale Durchgänge, wie zum Beispiel zwischen Bäumen, und ähnliche Hindernisse überwunden werden sollen, oder wenn das Fahrzeug amphibisch eingesetzt wird. So hat alles darauf hingewiesen, daß Geländefahrzeuge lang und schmal gemacht werden sollen. Dies steht im Gegensatz zu der heutigen Tendenz [1; 2].

Morphologische Studien von langen schmalen Fahrzeugen haben erkennen lassen, daß ihr Gewicht in demselben Maße wie die Bodenauffläche zunehmen würde, wenn die Länge vergrößert würde, jedoch nicht ihre Breite und Höhe; der Auflagedruck würde konstant bleiben. Das Konzept eines solchen Fahrzeuges entspricht der Idee eines Eisenbahnzuges; es wurde daher von mir das „Zug-Konzept“ genannt [1; 2].

Der grundsätzlichen Tendenz einer Erhöhung der Flächenpressung mit dem Gewicht für konventionelle Fahrzeuge ist die Konstanz der Flächenpressung unabhängig vom Gesamtgewicht für zugähnliche Fahrzeuge in Bild 14 gegenübergestellt. Solche Fahrzeuge bieten eine einzigartige Gelegenheit, den Auflagedruck selbst bei sehr hohen Gewichten sehr niedrig zu halten. Damit können auch große Fahrzeuge auf weichem Boden sehr beweglich sein.

Analytische Untersuchungen und Messungen mit solchen Modellfahrzeugen, von denen das erste 1949 gebaut worden ist, haben diese Erwartungen bestätigt [2]. So wurde das Konzept von Fahrzeugen, die heute "articulated vehicles", gegliederte Fahrzeuge, genannt werden, wiedergeboren.

Die Idee, zwei oder mehr Einheiten miteinander zu verbinden, war nicht neu. Ein Patent für solche Fahrzeuge ist in England 1911 an B. J. DIPLOCK erteilt worden. 1915 hat ferner das britische "Landships Committee" dasselbe Konzept für den Entwurf von Panzerfahrzeugen untersucht. PAVESI in Italien stellte 1914 ein erfolgreiches Radfahrzeug mit Knicklenkung her. Andere ähnliche Fahrzeuge wurden später produziert. Sie wurden jedoch nur als spezifische Bauarten und nicht als der Ausdruck eines breiten, allgemeinen Konzeptes betrachtet. Infolgedessen wurde ihre



Bild 15: Gegliedertes Kettenfahrzeug „Cobra“



Bild 16: Gegliedertes Radfahrzeug „Marv“

grundsätzliche Bedeutung niemals voll erkannt; sie fanden nie eine wirklich ernste Betrachtung und Anerkennung. Die Lage hat sich jedoch radikal unter dem Einfluß der theoretischen und experimentellen Betrachtungen geändert, über die hier berichtet wird. Eine Reihe solcher Fahrzeuge ist kürzlich sowohl in Kanada als auch in den Vereinigten Staaten gebaut worden. Es existieren heute zumindest neun verschiedene Typen dieser Gliederfahrzeuge, die gemäß den hier dargelegten Gedanken entworfen worden sind. Sie alle haben die in sie gesetzten Hoffnungen bestätigt. Um nur die letzten und die vielleicht wirklich kennzeichnenden Versuchsentwicklungen zu erwähnen (Bild 15), kann man auf das Trägerfahrzeug hinweisen, das aus drei mit Gliederketten ausgerüsteten Einheiten besteht, die sogenannte „COBRA“, die durch das Land Locomotion Laboratory of the U. S. Army entwickelt worden ist, ferner auf das aus drei Radeinheiten bestehende Versuchsfahrzeug, das sogenannte „MARV“, das durch die General Motors Defense Research Laboratories gebaut worden ist. Dieses letztere Fahrzeug besteht aus Einachseinheiten, von denen jede einen eigenen Motor besitzt (Bild 16).

Die bereits vorhandenen Erfahrungen lassen noch eine Reihe anderer Vorteile dieser „Glieder-Züge“ erkennen, beispielsweise erhöhte Geschwindigkeit im Einsatz und Wirtschaftlichkeit der Produktion und des Nachschubes. Ferner sind beim Einsatz als amphibische Fahrzeuge höhere Geschwindigkeiten im Wasser infolge ihrer verbesserten Froudeschen Zahl bestätigt worden. Höhere Fahrgeschwindigkeiten von gegliederten Fahrzeugen in rauhem Gelände sind im Vergleich mit denen konventioneller Fahrzeuge derselben Klasse mit einem starren Rahmen durch die günstige gegenseitige Abstimmung der Schwingbewegungen der einzelnen Glieder erklärbar; sie ergibt eine Dämpfung der resultierenden Schwingungen des ganzen Fahrzeuges. Ferner kann der ganze Körper des Fahrzeuges der Geländeoberfläche folgen; auf diese Art werden Aufprall und Stoß verringert. Dies führt auch zu einer praktisch gleichen und einheitlichen Lastverteilung auf die Räder oder Ketten; hierdurch wird die Zugkraft größer, die zur Überwindung von Widerständen oder für den Zug von Lasten zur Verfügung steht. Bild 17 läßt dies klar erkennen. Die Bilder 17a und 17b zeigen ein gegliedertes Modell eines Mondfahrzeuges und sein Gegenstück, das mit einem starren Rahmen ausgerüstet ist. Wenn beide ein Hindernis auf einem harten Grund bei hoher Haftung zu überwinden haben, dann hängen nach Bild 17b die Vorderräder der starren Version „in der Luft“, und man kann sich den Stoß vorstellen, wenn das Fahrzeug vorn überkippt. Seine Zugfähigkeit auf hartem Grund ist nicht notwendigerweise beeinträchtigt, da sie der Last mal dem Reibungskoeffizienten entspricht. Aber auf weichem Grund, wie in den Bildern 17c und 17d gezeigt, kann das Gliederfahrzeug ein mehrfach höheres Hindernis als das Fahrzeug mit starrem Rahmen überwinden. Augenscheinlich entwickelt unter diesen Umständen das Gliederfahrzeug mehr Zugkraft als das Konventionelle.

Große wirtschaftliche Vorteile bei Beschaffung und Nachschub von Fahrzeugen erscheinen möglich, wenn sie für einen weiten

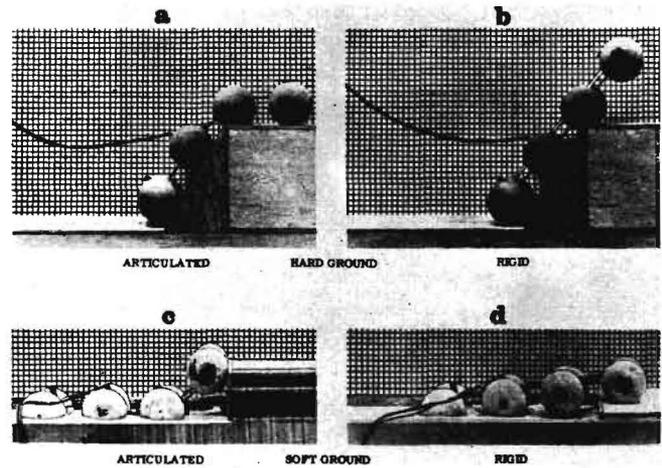


Bild 17: Überwindung von Hindernissen bei gegliederten und starren Fahrzeugen

Nutzlast-Bereich mit wenigen Typen von Motoren, Getrieben, Federungen und Endtriebsätzen entworfen sind. Identische Einheiten können dann an den Zug angefügt werden, wenn eine größere Tragfähigkeit erforderlich ist. Die Idee des Zuges erscheint so besonders für eine Variation von Fahrzeugformen geeignet, die alle auf denselben Elementen basieren.

Die Probleme, denen der Konstrukteur solcher Fahrzeuge gegenübersteht, scheinen nicht ernster Natur zu sein, obwohl noch viel getan werden muß, besonders für die Richtungsstabilität und die Lenkung. Die bisherigen Ergebnisse scheinen sehr ermutigend.

Auf lange Zeit gerechnet, kann man sich vorstellen, daß die Entwicklung von gegliederten Gelände-Fahrzeugen, die auf einer beschränkten Zahl von Grundelementen aufbaut, einen weiten Nutzlastbereich, etwa von 1 bis zu 20 t, überdecken könnte. Weitere Verfeinerung und Anwendung der hier beschriebenen Methode würden den Entwurf und die Abschätzung einander unterstützender Konzeptionen ermöglichen.

Nun zum Schluß: Bodeneigenschaften müssen gemessen und ihr Wechsel mit dem Klima und der Geographie muß statistisch erfaßt werden. Laboratoriumsuntersuchungen der Mechanik der Fortbewegung im Gelände und der Bewegungsfähigkeit von Fahrzeugen, Aufnahme der physikalischen und geometrischen Eigenschaften des Geländes und Anwendung der modernen Methoden der Planungsrechnung zur Optimierung des Systems aus Gelände und Fahrzeug können wohl eine Generation von Fachleuten voll beschäftigen.

### Zusammenfassung

Nach einem Überblick über die Geschichte der Forschung in der Mechanik der Geländefahrt schildert der Verfasser seine Bemühungen um die Aufstellung einer umfassenden Theorie. Hier bei geht er zunächst von der COULOMBSchen Gleichung für den Bodendruck und von den Beziehungen zwischen Spannung und Dehnung bei Stoffen, die nicht dem HOOKESchen Gesetz folgen, aus und stellt unter Einführung empirischer Werte allgemeine Gleichungen auf, die die Beziehung zwischen Bodendruck, Einsinktiefe und Scherspannung wiedergeben.

Auf dieser Grundlage werden Gleichungen für den Zugkraftbeiwert (Verhältnis von Zugkraft zum Fahrzeuggewicht) für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Laufwerken als Funktion der Bodenbeiwerte aufgestellt. Damit errechnete Werte werden mit den Ergebnissen von Versuchen mit Modell- und Originalfahrzeugen verglichen.

Auftretende Abweichungen werden im einzelnen erörtert und begründet. Das System Gelände-Fahrzeug mußte bei den weiteren Untersuchungen statistisch erfaßt werden. Dieser Tatsache wurde durch eine Hypothese über die Wahrscheinlichkeit Rechnung getragen, mit der sich statistische Schwankungen der Bodenwerte auf die Zugleistung beliebiger Fahrzeuge auswirken. Ein neues Instrument zur Messung der Bodenwerte, das „Bevameter“, wird beschrieben.

Aus den obigen Berechnungen und Messungen leitet der Verfasser eine Reihe von Folgerungen für die Gestaltung und Bewegung von geländegängigen Fahrzeugen ab, unter anderem von Gliederfahrzeugen. Hierbei werden auch die Einsatzmöglichkeiten solcher Fahrzeuge bei der Erkundung von Planeten (Mondfahrzeuge) gestreift.

## Schrifttum

- [1] BEKKER, M. G.: Theory of land locomotion - the mechanics of vehicle mobility. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan 1956
- [2] BEKKER, M. G.: Off-the-road locomotion-research and development of terramechanics. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan 1960
- [3] MORIN, M. A.: Memoir sur le tirage des voitures . . . Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris 1840 and 1841
- [4] SHOEMAKER, E. M.: Exploration of the moon's surface. American Scientist, March 1962
- [5] BERNSTEIN, R.: Probleme zur experimentellen Motorflugmechanik. Der Motorwagen 1913
- [6] GORIATCHIKIN, B. P.: Teoria i proizvodstvo sielskohozyanih mashin. Moscow 1936
- [7] MICKLETHWAITE, E. W. E.: Soil mechanics in relation to fighting vehicles. School of Tank Technology, Chertsey 1944
- [8] TERZAGHI, K.: Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York 1944
- [9] BEKKER, M. G.: Tracks or wheels. Automobile Engineer (1955) No. 6
- [10] FÖPPL, A.: Vorlesungen über technische Mechanik. Leipzig 1900
- [11] TAYLOR, D. E.: Fundamentals of soil mechanics. John Wiley and Sons, New York 1948
- [12] BEKKER, M. G.: A proposed system of physical and geometrical terrain values for the determination of vehicle performance and soil trafficability. Proc. of the Vehicle Mobility Symposium, Office of Ordnance Research, Duke University and Stevens Institute of Technology, OTAC, Detroit 1955
- [13] BEKKER, M. G.: An introduction to research on vehicle mobility-Part I, the stability problem. First printing: Dept. of National Defence, Ottawa, 1948; second printing: U.S. Ord. Dept., Aberdeen, Maryland, 1951, third printing: Land Locomotion Laboratory, OTAC, Detroit 1958
- [14] KOZIN, F., and T. L. BOGDANOFF: On the statistical properties of the ground contour and its relation to the study of locomotion. Proc. of the First International Conf. on the Mechanics of Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [15] BEKKER, M. G.: Evaluation and selection of optimum vehicle types under random terrain conditions. Proc. of the First International Conf. on the Mechanics of Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [16] BEKKER, M. G.: Where do we go from here-closing address. Proc. of the First International Conf. on Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [17] OGORKIEWICZ, R.: Off-the-road locomotion. The Engineer 1961, 212, Nos. 5502, 5503, 5504
- [18] SELA, A. D.: On the slip and tractive effort. Proc. of the First International Conf. on the Mechanics of Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [19] BEKKER, M. G.: Methods of evaluation of off-the-road locomotion. Technical Memorandum No. 247. Operations Research Office, The Johns Hopkins University, Washington 1953
- [20] JANOSI, Z.: An analysis of pneumatic tyre performance on deformable soil. Proc. of the First International Conf. on Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [21] HARRISON, W. L.: Analytical prediction of performance for full size and small scale model vehicles. Proc. of the First International Conf. on Terrain-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Tecnica, Turin 1962
- [22] BEKKER, M. G.: Mobility of cross country vehicles. Penton Publishing Co. Cleveland/Ohio 1960
- [23] SCHURING, D.: Zur Mechanik des starren Rades auf weichem Boden. VDI 103 (1961) No. 16
- [24] BEKKER, M. G.: Mechanics of vehicle mobility in off-the-road locomotion. Applied Mechanics Reviews 2 (1958) No. 8
- [25] BEKKER, M. G.: Latest developments in off-the-road locomotion. Franklin Institute Journal (1957) No. 5
- [26] BEKKER, M. G.: Über die Wechselbeziehung zwischen Fahrzeug und Boden bei Geländefahrt. Automobiltechnische Zeitschrift 62 (1960) No. 7
- [27] BEKKER, M. G.: Mecánica de vehículos en locomoción fuera del camino. Ciencia y Técnica (1958) No. 632
- [28] JANOSI, Z.: Soil values in land locomotion. Journal of Agricultural Engineering Research 5 (1960) No. 1
- [29] JANOSI, Z.: Caratteristiche del terreno negli studi di movimento fuori strada. Meccanizzazione Agricola (1961) No. 2
- [30] SÖHNE, W.: Wechselbeziehung zwischen Fahrzeugwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn. In: 18. Konstrukteurheft, 2. Teil (Grundlagen der Landtechnik, Heft 13) S. 21—34
- [31] FRENKIN, M. S.: Podvijnost avtomobilya na perezennyj mesnostj. Avtomobilnaja Promyslennost' (1962) No. 4
- [32] BEKKER, M. G., and G. RETTIG: Obstacle Performance of Wheeled Vehicles. Report No. 29, Land Locomotion Lab., U.S. Army Ord. Tank Automotive Command, Detroit/Michigan 1958
- [33] THOMPSON, SIR D'ARCY WENTWORTH: On growth and form. Cambridge University Press, Cambridge 1949

## Résumé

Mieczyslaw Gregory Bekker: "The Mechanics of Cross-Country Vehicles".

After giving a survey of the history of research on the mechanics of cross-country vehicles the author describes his efforts to evolve a comprehensive theory. He first starts from Coulomb's equation for the soil pressure and from the relationships between the tension and strain of materials not following Hook's law. In introducing empirical values he establishes general equations which reproduce the relations between soil pressure, depth of extension and shear stress.

On this basis equations for the traction coefficient (relation from the traction to the weight of the vehicle) of vehicles with different rolling gears depending on the soil coefficients are set up. The values obtained are compared with the results of experiments made with model and original vehicles.

Deviations are discussed in detail and motivated. In further examinations the system cross-country vehicle had to be determined statistically. This fact has been taken into account by a hypothesis on the probability with which statistical variations of the soil values affect the tractive power of any vehicle. In this connection a new instrument for measuring the soil values, the "Bevometer", is described.

From the above calculations and measurements the author derives a number of conclusions for the design and motion of cross-country vehicles, among others also of jointed vehicles. Hereby the application possibilities of such vehicles for the exploration of planets (moon vehicles) are dealt with briefly.

Mieczyslaw Gregory Bekker: «La mécanique de la marche en terrain».

Après avoir donné un aperçu sur l'histoire de la recherche dans la marche en terrain, l'auteur décrit ses études effectuées en vue de l'établissement d'une théorie complète. Il prend d'abord pour base l'équation de Coulomb sur la pression du sol et les relations entre la tension et l'allongement valables pour les corps qui ne suivent pas la loi de Hook, et il élabore des équations générales en introduisant des valeurs empiriques qui traduisent les relations entre la pression du sol, la profondeur de pénétration et la tension de cisaillement. Sur ces éléments, il établit ensuite pour plusieurs véhicules munis de systèmes d'avancement différents, des équations du coefficient de traction en tant que fonction des caractéristiques du sol (rapport entre l'effort de traction et le poids du véhicule). Les valeurs ainsi calculées sont comparées aux résultats des essais entrepris avec des modèles réduits et des véhicules en grandeur normale.

Les variations constatées sont discutées en détail et expliquées. Le système terrain-véhicule a dû être déterminé de façon statistique pour les recherches ultérieures. On a tenu compte de ce fait par une hypothèse sur la vraisemblance avec laquelle les variations statistiques des caractéristiques du sol influent sur la puissance de traction de véhicules quelconques. Dans cet ordre d'idées on décrit un nouvel instrument utilisé pour la mesure des valeurs du sol, appelé Bevamètre.

L'auteur déduit des calculs mentionnés ci-dessus un certain nombre de propositions pour la conception et la marche de véhicules s'adaptant facilement au terrain, entre autres de véhicules composés de plusieurs unités reliées de façon souple. On mentionne aussi les possibilités d'utilisation de ces véhicules pour l'exploration de planètes (véhicules de la lune).

Mieczyslaw Gregory Bekker: «La mecánica de la marcha por todo terreno.»

Después de una ojeada a la historia de la investigación de la mecánica de la marcha por todo terreno, el autor habla de sus trabajos para llegar a una teoría amplia, saliendo en primer lugar de la ecuación de Coulomb para la presión del suelo y de las relaciones entre tensión y dilatación de los materiales que no siguen la ley de Hook y, empleando valores empíricos, establece ecuaciones generales que representan las relaciones existentes entre la presión del suelo, la profundidad del surco y la tensión de cortadura.

Sobre esta base se establecen ecuaciones para el coeficiente del esfuerzo de tracción (relación entre esfuerzo de tracción y peso del vehículo) para vehículos con varias clases de mecanismo de rodadura en función de los coeficientes del terreno. Los valores calculados se comparan con los resultados de los ensayos hechos con vehículos — modelo y originales.

Las diferencias que resultan, se examinan y se razonan en detalle. Para las investigaciones siguientes era preciso concebir el sistema de vehículo todo terreno en forma estadística. Este hecho se ha tomado en cuenta con una hipótesis en cuanto a la probabilidad de las influencias que ejercen las oscilaciones estadísticas de los valores de terreno sobre el esfuerzo de tracción de vehículos de cualquiera clase. Se describe un nuevo instrumento para la medición de los valores de terreno, el «bevámetro».

De los cálculos y de las mediciones citadas el autor saca una serie de deducciones para la configuración y el movimiento de vehículos todo terreno, entre otros para vehículos oruga. De paso se habla de las posibilidades de empleo de estos vehículos para la exploración de planetas (vehículos lunares).