

Zur Mechanik des Rad-Boden-Kontaktes

Prof. Dr. sc. techn. A. Duda

Zum Stand der Forschung

Seit 1976 wird im Lehrgebiet Technische Mechanik der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg an Forschungsaufgaben der landtechnischen Bodenmechanik gearbeitet. Im Rahmen dieser Forschung wurden theoretische und experimentelle Grundlagen für die Anwendung der Gesetze der Mechanik auf die Wechselwirkungsvorgänge zwischen Fahrwerk bzw. Werkzeug und dem Boden geschaffen. Für diese Untersuchungen besteht zunehmendes ökonomisches Interesse. Der hohe Mechanisierungsgrad bei der Bodenbearbeitung, der Einsatz leistungsfähiger, aber dabei auch schwerer Technik führte in der Landwirtschaft zum unerwünschten ertragsmindernden Effekt der Bodenverdichtung. Andererseits hängt der Energieverbrauch beim Befahren und Bearbeiten landwirtschaftlicher Böden wesentlich vom Zusammenwirken des Fahrwerks bzw. Werkzeugs mit dem Boden ab.

Von der landtechnischen Bodenmechanik werden Beiträge zur optimalen Gestaltung der Bodenbearbeitungsprozesse, der eingesetzten Technik (Fahrwerke, Werkzeuge) und zur Ertragssteigerung durch Verminderung der Bodenverdichtung erwartet. Speziell die Untersuchungen zur Befahrbarkeit von Böden geringer Tragfähigkeit sowie die für die Auslegung und den energiesparenden Einsatz von Geländefahrzeugen sind auch für andere Einsatzbereiche relevant.

Mit der Zielstellung, zur effektiven Lösung der o. g. Aufgaben beizutragen, wurde die Mechanikforschung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg in den vergangenen Jahren auf folgende Schwerpunkte konzentriert [1]:

- theoretische Formulierung und experimentelle Begründung geeigneter Stoffgesetze für den zu befahrenden Boden, Aufbau des Bodenmechaniklabors der Ingenieurhochschule
- Untersuchung der mechanischen Wechselwirkung Fahrwerk-Boden (Radaufstandflächen, Kontaktspannungen Rad-Boden)
- Bestimmung der Bodenverdichtungen und Vergleich mit den aus agronomischer Sicht zulässigen Werten.

In der Stoffgesetzforschung wurde ein Stand erreicht, der es ermöglicht, vorhandene Ansätze aus der Bodenmechanik für landtechnische und fahrzeugtechnische Problemstellungen zu nutzen. Die an der Ingenieurhochschule entwickelte bodenmechanische Versuchstechnik, einschließlich Triaxialtests, gibt die Möglichkeit, das mechanische Verhalten von Bodenelementen umfassend zu untersuchen und die Parameter des gewählten Stoffgesetzes zu bestimmen.

Im Rahmen des Arbeitsschwerpunkts „Kontaktproblem“ wurden mit vereinfachten Bodenmodellen, die aber wesentliche Einflüsse, wie Plastizität, Zeitabhängigkeit, Rollgeschwindigkeit, auf die Bodenformation berücksichtigen, Untersuchungen zur Berechnung der Radaufstandflächen, der Kontaktspannungen Rad-Boden und des Rollwiderstands durchgeführt. Als Vorbereitung für die Lösung des dreidimensionalen Kontaktproblems wurde der Rad-Boden-Kontakt in

zweidimensionaler Form modelliert und der Reifen als Flächenkonstruktion (Schale) eingeführt.

Für die Bestimmung des Spannungs- und Deformationszustands des durch Radfahrwerke belasteten Bodens wurde die Methode der finiten Elemente (FEM) aufbereitet. Durch die Lösung der entsprechenden Randwertprobleme wurden Praxisaufgaben, wie Einfluß von Bodeneinschlüssen (Spannungsmeßdosens) auf den Spannungszustand im Boden, Bodenverdichtungen unter Zwillingrädern, Verdichtungswirkung eines Gleisbands, Einfluß der Werkzeuggeometrie bei Wiederverdichtungsprozessen nach Krumbasislockerung von geschichteten Böden, untersucht.

Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen

Um einen Eindruck von der schädlichen Wirkung der Fahrwerke auf den Ackerboden zu vermitteln, sei an folgende Tatsachen erinnert [2]:

- Im Prozeß der Bodenbearbeitung, Saat, Pflanzenpflege und Ernte fahren die verschiedenen Maschinen 5- bis 15mal über den Boden (Gesamtfläche der Fahrspuren etwa gleich der doppelten Feldgröße; 10 bis 12% der Feldfläche werden 6- bis 20mal, 65 bis 80% 1- bis 6mal und nur 10 bis 15% überhaupt nicht überfahren). Die Tiefenwirkung der Bodenverdichtung erreicht dabei 300 bis 600 mm. Am stärksten sind die Verdichtungen in der fruchtbaren oberen Bodenschicht. (In letzter Zeit wird versucht, die zu befahrende Bodenfläche durch konsequentes Spurfahren und Optimieren der Feldbearbeitungsprozesse zu verringern.)
- Bedingt durch die unterschiedlichen Bodenverdichtungen ergeben sich veränderliche Zugwiderstände auf der Bearbeitungsstrecke. Nach Angaben des Moskauer Instituts für Landwirtschaftsmechanisierung (VIM) steigt beim Pflügen der Zugwiderstand in Spuren von Kettentraktoren um 25%, in Spuren von Radtraktoren um 40%, in Spuren schwerer LKW um 65% im Vergleich zum Widerstand auf nicht verdichteten Flächen. Außerdem ist i. allg. die Richtung der Bodenbearbeitung nicht identisch mit der Richtung der vorher gelegten Spuren. Das führt zu ungleichmäßigen Arbeitstiefen und damit zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch.
- Die bodenschädigende mechanische Einwirkung der Fahrwerke ist nicht nur vom Aspekt der Verdichtung her zu bewerten. Gleichzeitig erfolgt eine intensive Zerstörung der Bodenstruktur, vor allem durch die Schubbeanspruchung beim Schlupf.

Das Problem „Fahrwerk – Boden – Ertrag“ ist also eine komplexe Aufgabe, bei deren Lösung der Systemzusammenhang zwischen Maschinenkonstruktion, Maschineneinsatz, landwirtschaftlicher Kultur und den Entwicklungstendenzen der Landtechnik sowie angrenzender Gebiete (z. B. auch der Mechanik) zu beachten ist.

Neuerdings wird international die Forderung nach ökologischen Expertisen für landwirtschaftliche Maschinen erhoben. Das bezieht sich besonders auf die Entwicklung einer bo-

denschonenden Landtechnik, speziell auf bodenschonende Fahrwerke. Und da bodenschonende Fahrwerke oft einen höheren Rollwiderstand haben, durch den der Energieverbrauch steigt, ist ihr zweckmäßiger Einsatz mit einer Optimierung des Aufwands für Fahrwerksgestaltung und Energie einerseits und mit der Verbesserung der Erträge andererseits verbunden.

Eine Voraussetzung für die Entwicklung und den zweckmäßigen Einsatz bodenschonender und energiesparender Fahrwerke ist die Bereitstellung wissenschaftlich begründeter Methoden, die es gestatten, die Einflußparameter des Rad-Boden-Kontaktes in ihrer gesamten Variationsbreite zu berücksichtigen. Als wesentlicher Einflußparameter ist der Kontaktdruck des Rades auf den Böden zu untersuchen.

Hauptsächlich sind folgende drei Kenngrößen der Reifen zu beachten, die unabhängig voneinander innerhalb bestimmter Grenzen variiert werden können:

- Radlast
- Reifenabmessungen (Radius, Breite)
- Reifeninnendruck.

Durch Variation dieser Größen – einzeln oder in verschiedenen Kombinationen – ist es möglich, den Kontaktdruck zu verändern. Einige wichtige Kombinationen sind in Tafel 1 zusammengestellt. Der mittlere Kontaktdruck kann durch Reduzierung der Radlast (Variante 1), Erhöhung der Reifenbreite (Variante 2) oder Verminderung des Reifeninnendrucks (Variante 3) verringert werden. Die effektivste Maßnahme wäre die Kombination aller dieser Effekte (Variante 7), was aber die Ausführung einer völlig neuen Fahrwerkskonstruktion bedeuten würde. Einfacher erscheint die Reduzierung des Kontaktdrucks entsprechend den Varianten 5 und 6. Durch gleichzeitige Erhöhung/Verringerung von Radlast und Reifenbreite entsteht eine geringe Verminderung des Kontaktdrucks (Variante 4).

Weitere aussichtsreiche Möglichkeiten der Reduzierung des Kontaktdrucks liegen in der Anwendung von Zwillingrädern, Breitreifen und von Niederdruckreifen, die sich vom gewöhnlichen Reifen durch das Auftreten großer Deformationen unterscheiden.

Die Reifendeformation und das Einsinken in den Boden sind wesentliche Merkmale des Kontaktproblems Rad-Boden. Sie sind abhängig von der Steifigkeit des Reifens (T) und des Bodens (S), und das in gegenläufiger

Tafel 1. Möglichkeiten der Reduzierung des mittleren Kontaktdrucks unter Rädern [3]

Variante	unabhängige Variable			abhängige Variable mittlerer Kontakt- druck
	Radlast	Reifen- breite	Reifen- innen- druck	
1	-	0	0	-
2	0	+	0	-
3	0	0	-	-
4	+/-	+/-	0	0
5	-	0	-	-
6	0	+	-	-
7	-	+	-	-

+ ansteigend, - abfallend, 0 unverändert

Weise. Diese Abhängigkeit ist qualitativ im Bild 1 dargestellt. Für nachgiebigen Boden kann ein Reifen mittlerer Steifigkeit wegen der kleinen Durchbiegungen als starr angenommen werden (Variante 1), während bei einem flexiblen Reifen auf relativ starrem Boden nur die Reifendeformationen zu berücksichtigen sind (Variante 2). Praktisch wichtige Varianten des Rad-Boden-Zusammenwirkens liegen dazwischen. Obwohl das Bild 1 keinerlei quantitative Aussage enthält, macht es jedoch die qualitative Seite des Problems deutlich. Jedes verwendete Rad-Boden-Modell muß mindestens diesen qualitativen Zusammenhang wiedergeben.

Weitere wesentliche Einflußparameter sind die Fahrgeschwindigkeit und die Anzahl der Überfahrten. Auch sie müssen in einem realistischen Rad-Boden-Modell vorhanden sein.

Wegen der vielfältigen Kombinationen von Radtypen, Einsatzbedingungen und Bodeneigenschaften besteht der Bedarf nach einer allgemeinen angewandten Theorie für die Vorausberechnung der Bodenverdichtung durch Räder. Ebenso besteht die Notwendigkeit, eine standardisierte Methode zur Darstellung des Bodenverhaltens mit Hilfe geeigneter, der praktischen Lösung des Kontaktproblems Rad-Boden angepaßter Stoffgesetze zu schaffen.

Zielstellungen der weiteren Forschungsarbeit

Entsprechend der Forschungskonzeption im Lehrgebiet Technische Mechanik an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg werden die Forschungen zur landtechnischen Bodenmechanik in Fortführung der o. g. Schwerpunkte weiter auf das bodenschonende und energiesparende Fahrwerk konzentriert. Dabei ist vorgesehen, verstärkt Ap-

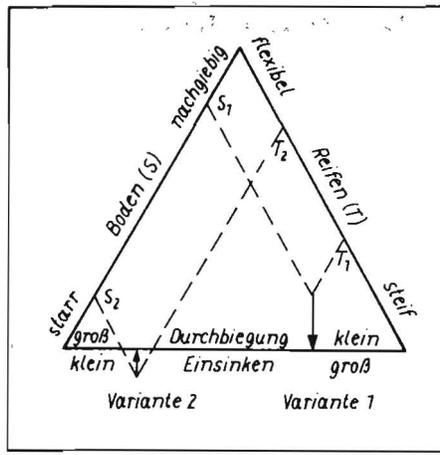


Bild 1. Schematische Darstellung des Reifen-Boden-Deformationsverhaltens [4]

plikationsarbeit für interessierte Nutzer der Landwirtschaft und anderer Volkswirtschaftsbereiche zu leisten.

Gemäß den im ersten Abschnitt genannten Arbeitsschwerpunkten sollen die künftigen Forschungen in drei Ebenen mit z. T. unterschiedlichem, der praktischen Zielstellung angepaßtem Grad der Modellgenauigkeit durchgeführt werden (vgl. Tafel 2).

Einige Lösungsansätze und Ergebnisse zu den in der Tafel 2 genannten Teilaufgaben der Modellierung sind in den Bildern 2 bis 6 dargestellt.

Folgende konkrete Aufgaben sind in den nächsten Jahren zu bearbeiten:

- Anpassung ausgewählter elastisch-plastischer und rheologischer Stoffgesetze an konkrete Aufgaben der Rad-Boden-Problematik und des Verdichtungsverhaltens des landwirtschaftlich genutzten Bodens bei verschiedenen Zuständen. Experimen-

Tafel 2. Teilaufgaben der Modellierung der Fahrwerkseinwirkung auf den Boden

Teilaufgabe	Ziel der Untersuchung	Literatur
Bodenmodellierung		
Theoretische Formulierung und experimentelle Bestimmung geeigneter Stoffgesetze	Schaffung der Voraussetzungen für bodenmechanische Untersuchungen	[4 bis 7]
Lösung der Randwertaufgaben für gegebene Normal- und Schublastverteilungen	Bestimmung der Spannungen und Deformationen im landwirtschaftlich genutzten Boden (ggf. mit FEM)	[4 bis 7]
Reifenmodellierung		
Eindimensionale Band- oder Ringmodelle	Spannungs-Deformationsverhalten von Reifen bei vorgegebener Normal- und Schubbelastung in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck, Berechnung von Niederdruckreifen (äußere Reifenmechanik)	[8]
Netzmodelle und Membranmodelle		
Schalenmodelle, ggf. halbmomentenfrei		
Dreidimensionale FEM-Modellierung		
Kontaktmodellierung		
Ingenieurmodelle auf der Grundlage der Technischen Mechanik	Durchführung von praktischen Berechnungen	[5, 9, 10]
Anwendung der Kontinuumsmechanik auf vereinfachte Referenzmodelle (z. B. Walze)	Kontrolle und Präzisierung der Praxismethoden, Vorbereitung der wirklichkeitsnahen Modellierung	[11]
Wirklichkeitsnahe Modellierung des Kontaktproblems Reifen-Boden (Variationsformulierung)	Anwendung numerischer Methoden, besonders der FEM (nichtlineare Optimierung)	[12]

Bild 2
Kompressionsversuch auf Triaxialgerät mit Ent- und Wiederbelastungszyklen zur Simulation des Mehrfachbefahrens (nach Huth in [1])

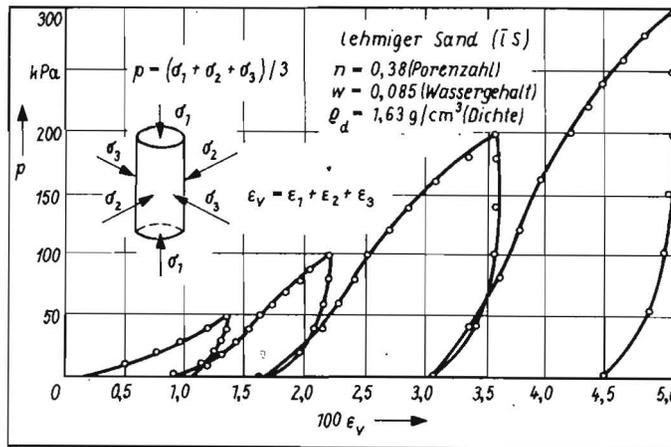
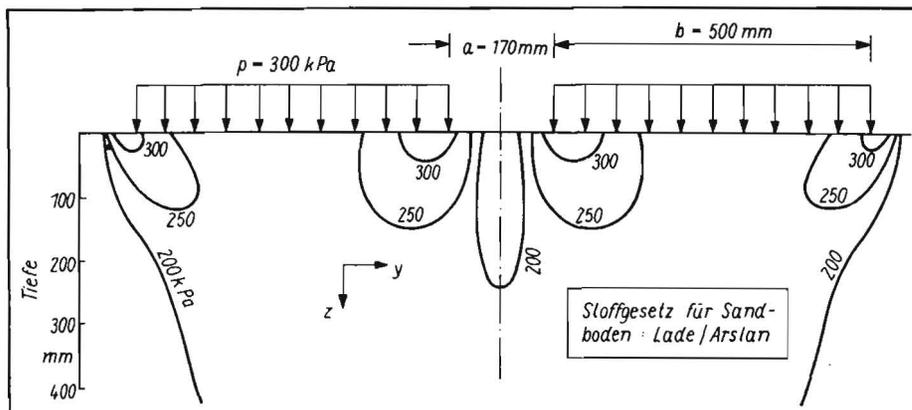


Bild 3
Verlauf der Spannungen σ_z unter einem Zwillingsrad, ermittelt mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (nach Hemmann in [1])



telles Bestimmung der zugehörigen Bodenparameter. Weiterentwicklung des Bodenmechaniklabors für die praxisorientierte Applikationsforschung zur landtechnischen Bodenmechanik.

- Erarbeitung der Grundlagen für eine qualitative Bewertung der praxisrelevanten Charakteristiken des Rad-Boden-Kontaktes (Reifeninnendruck, Aufstandfläche, Kontaktspannungen, Einsinktiefen, Fahrgeschwindigkeit, Überrollhäufigkeit). Untersuchung des Spannungs- und Deformationszustands des Reifens (normaler Reifen und Niederdruckreifen) auf nachgiebiger Fahrbahn bei Verwendung vereinfachter Ring- und Schalenmodelle.
- Analytische und numerische Untersuchungen des Spannungs- und Deformationszustands im Boden unter verschiedenen Fahrwerkslasten auf der Basis der Kontinuumsmechanik. Durchführung von Vergleichsrechnungen zur ebenen und

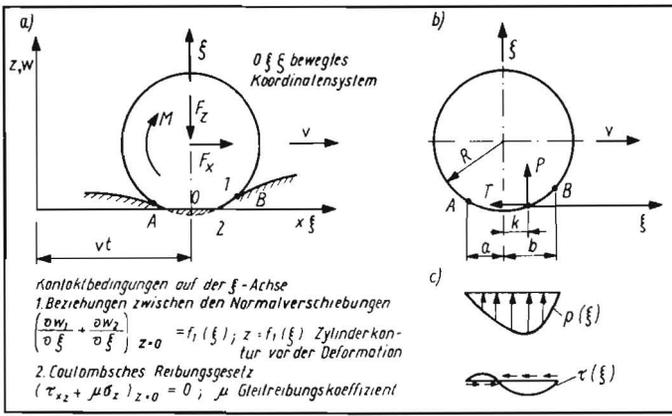


Bild 4. Beschreibung des Kontaktproblems Rad-Boden über Referenzmodell viskoelastischer Vollzylinder auf viskoelastischem Untergrund mit Berücksichtigung der Gleitreibung (nach Wille in [1])
 a) Ansatz, b) Ergebnis, c) Verteilung der Normal- und Schubspannungen in der Kontaktebene

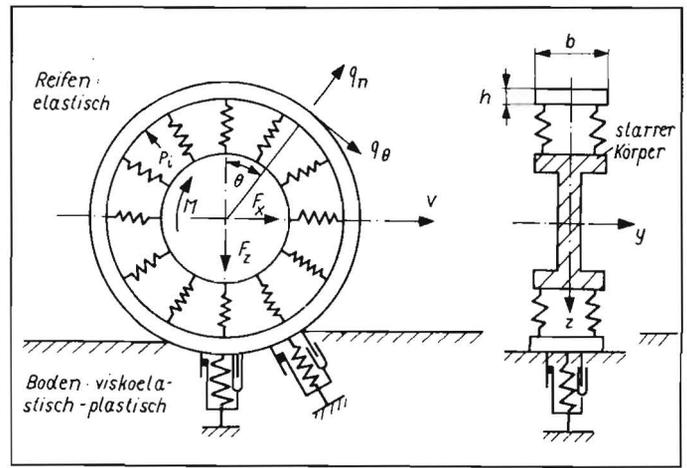


Bild 5. Vereinfachtes Ringmodell für das Zusammenwirken zwischen Boden und Niederdruckreifen

Bild 6. Verschiedene Reifenmodelle

räumlichen Modellierung. Vergleich mit experimentellen Daten aus der Landwirtschaftsforschung. Beurteilung von Praxismethoden anhand der theoretischen Ergebnisse.

Diese Forschungen dienen dem Erkenntnisvorauslauf für die Praxis und der Sicherung eines hohen Standards der Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet der Mechanik für die Landtechnik. Es ist vorgesehen, den an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vorhandenen Kenntnisvorauslauf für den systematischen Ausbau der Grundlagenforschung zur Bodenmechanik zu nutzen und die an der Hochschule gegebenen Möglichkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern, die sich mit der Fahrwerksentwicklung beschäftigen, weiter auszubauen.

Bezeichnung	mechanisches System
	Schalenmodell
	halbmomentenfreie Schale ($Q_\theta - M_\theta = M_{\phi\theta} = 0$)
	Ringbalken
	Membran
	Bandmodell ($Q_\theta - M_\theta = 0$)
	Netzmodell ($N_{\phi\theta} = 0$)

Literatur

[1] Mechanische Grundlagen zum Rad-Boden-Modell. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Forschungsbericht G4 1988 (unveröffentlicht).
 [2] Ksenevič, I. P.; Skotnikov, V. A.; Ljasko, M. I.: Chodovaja sistema – počva – urožaj (Fahrwerk Boden-Ertrag). Moskva: Agropromizdat 1985.
 [3] Soane, B. D.; Blackwell, P. S.; Dickson, J. W.; Painter, D. J.: Compaction by agricultural vehicles: A review. / Compaction under tyres and other running gear (Verdichtung durch Landwirtschaftsfahrzeuge: Ein Überblick. / Verdichtung unter Reifen und anderen Fahrwerken). Soil and Tillage Research, Amsterdam 1(1980/81), 373–400.
 [4] Karafiath, L. L.; Nowatzki, E. A.: Soil mechanics for off road vehicle engineering (Bodenmechanik für Geländefahrzeugtechnik). Clausthal: Trans. Tech. Publ. 1978.

[5] Bekker, M. G.: Introduction to terrain-vehicle systems (Einführung in die Landfahrzeugsysteme). The University of Michigan Press 1969.
 [6] Kezdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik, Bd. I-IV. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1976.
 [7] Atkinson, J. H.; Bransby, P. L.: The mechanics of soils—An introduction to critical state soil mechanics (Bodenmechanik—Eine Einführung in die Bodenmechanik des Kritischen Zustandes). London: Mc Graw Hill 1978.
 [8] Über die Anwendung der Methoden der Kontinuumsmechanik für die Lösung des Kontaktproblems Reifen-Boden. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Studie 1987 (unveröffentlicht).
 [9] Išlinski, A. Ju.; Kondratjeva, A. A.: O kačenii žestkich i pnevmatičeskich koles po deformiruemomu gruntu (Über das Rollen starrer und

pneumatischer Räder auf deformierbarem Boden). In: Prikladnye zadači mekhaniki, Bd. 1. Moskva: Nauka 1986.
 [10] Zolotarevskaja, D. I.: Issledovanie i rasčet uplotnenija počvy kolesnymi dvižiteljami (Untersuchung und Berechnung der Bodenverdichtung durch Radfahrwerke). Mehanizacija i elektrifikacija sel'skogo chozjajstva, Moskva 52(1982)2, S. 28–32.
 [11] Gladwell, G.: Contact problems in the classical theory of elasticity (Das Kontaktproblem in der Klassischen Elastizitätstheorie). Alphen aan den Rijn: Sijthoff and Noordhoff 1980.
 [12] Rothert, H.; Idelberger, H.; Jacobi, W.; Lagging, G.: On the contact problem of tires including friction (Über das Kontaktproblem von Reifen einschließlich Reibung). Tire Sc. Technol. vol. 13 (1085) 2.