

Druckverteilung unter Forstreifen

In Göttingen wurde auf Basis einer Marktanalyse der Kontaktflächendruck von 70 in Deutschland gebräuchlichen Forstreifen statisch gemessen. Gezielt variiert wurden dabei der Reifenfülldruck und die hydraulisch simulierte Radlast. Zur Berücksichtigung der Zwischenstollenräume erfolgte die Registrierung des Druckes unter einer 20 cm mächtigen Sandschicht.

Die Querschnitte der glockenförmigen Druckverteilungen lassen sich mit ausgezeichneter Treffsicherheit über eine e-Funktion ausgleichen. Dabei gelingt es, jede Druckverteilung mit nur zwei Modell-Parametern zu beschreiben, die voraussichtlich als valide Basis für die Beurteilung von Bodenschonung und Traktionsfähigkeit verwendet werden können.

Prof. Dr. Heribert Jacke leitet das Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Universität Göttingen, Büsgenweg 4, 37077 Göttingen; e-mail: hjacke@gwdg.de.
Dr. Andreas Ebel war an diesem Institut wissenschaftlicher Angestellter und hat zum beschriebenen Thema seine Dissertationsschrift verfasst.

Schlüsselwörter

Kontaktflächendruck, Fülldruck, Radlast, Druckverteilung, Forstreifen

Keywords

Contact area pressure, tire inflation pressure, load per wheel, pressure allocation, forest tires

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 06414 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

In einem Hochlohnland wie der Bundesrepublik Deutschland ist die Ernte vor allem schwächerer Holzsortimente wirtschaftlich nur noch hochmechanisiert durchzuführen. Die in solchen Verfahren eingesetzten Harvester verfügen über Eigenmassen, die derzeit zwischen 10 und 20 t schwanken. Die damit an den Rändern von Rückegassen deponierten Kurzholzsortimente werden anschließend mit speziellen Tragschleppern (Forwardern) aus dem Bestand an die Lkw-fähige Waldstraße gebracht. Forwarder der stärkeren Kategorie erreichen dabei im beladenen Zustand Achslasten von über 20 t, über jedes der (per Bogiekonstrukt) vier Räder der Achse wirkt also eine Kraft von (über) 50 kN auf den Waldboden. Die somit provozierte Druckbelastung führt zu kritisch beurteilten Veränderungen im Boden, insbesondere zu einer Minderung des Grob- und Mittelporenvolumens in bindigen Substraten.

Grundlagen

Bodenökologische Untersuchungen hatten bis Ende der 90er Jahre ausschließlich einen technischen Bezug zu einem „Kontaktflächendruck“, der sich aus dem Quotienten der Radlast und der „Stempelfläche“ des montierten Reifens auf harter Unterlage herleitete. Insbesondere beim Vergleich zwischen Standard- und Niederquerschnittreifen führte diese Bewertung zu Implausibilitäten, die letztendlich eine detaillierte Untersuchung der Verteilung des Druckes auf solchen Kontaktflächen forderten.

Eine Marktanalyse zu selbstfahrenden forstlichen Arbeitsmaschinen in Deutschland aus dem Jahre 2001 sollte die zu bemessende Stichprobe konkretisieren. Sie deutete auf 70 Reifen, die sich in ihrer Bauweise (Standard – Niederquerschnitt), in der Karkassenkonstruktion (diagonal – radial), in ihrer Tragfähigkeit (ausgedrückt durch

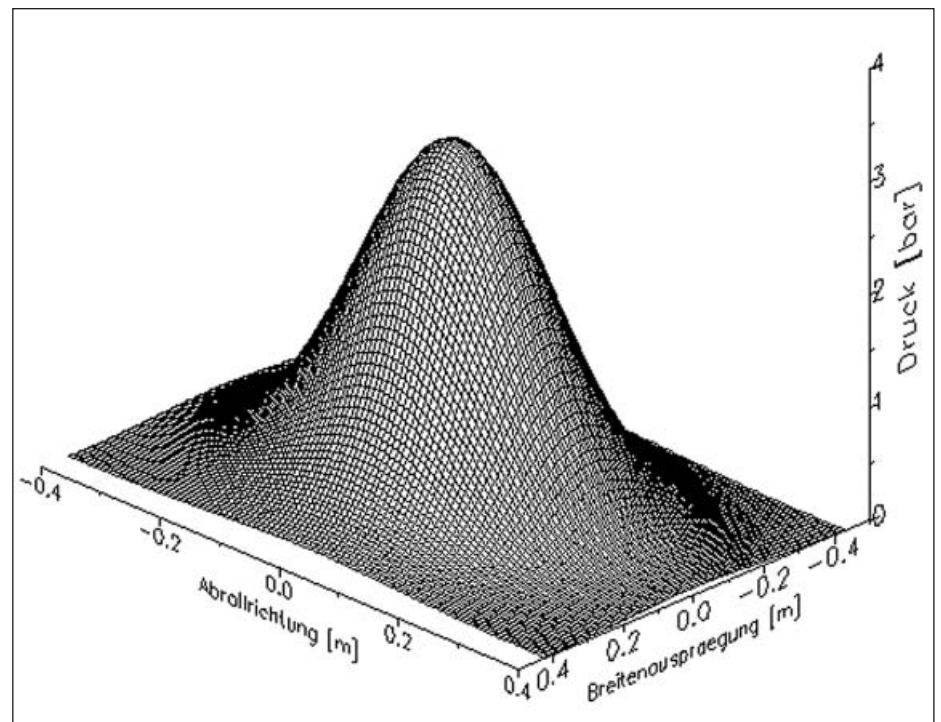


Bild 1: Exemplarische Verteilung des Kontaktflächendruckes unter einer 20 cm mächtigen Sandschicht

Fig. 1: Exemplary distribution of contact area pressure under a 20 cm thick sand layer

den Load-Index bei SI = A8) und damit natürlich in ihren Maßen (Raddurchmesser, Nennbreite ...) unterschieden. Dankenswerterweise erklärte sich die Reifenindustrie bereit, Kompletträder mit Neubereifung zu ihren Lasten frei Göttinger Institutswerkstatt zu liefern und nach Messung „zu entsorgen“. Der weit überwiegende Teil der Forstreifen entstammte den Werken zweier nordeuropäischer Hersteller.

Messverfahren

Die 70 Reifen wurden zunächst über eine Distanz von 5 km bewalkt, also unter Laborbedingungen eingefahren (bei Einfederung um 20 % der Nennhöhe über ein Stahlrollenpaar entsprechend dem dynamischen Radradius gedreht). Die Messung der Druckverteilung erfolgte anschließend sowohl auf hartem Untergrund als auch unter einer 20 cm mächtigen Feinsandschicht. Berichtet wird hier über die Messungen unter Sand, da es ein wesentliches Anliegen des Projektes war, die Drücke auf gewachsenen Böden zu ermitteln, auf denen der Zwischen-Stollenbereich (das Negativprofil) ebenfalls zur Abstützung der Radlast dient. Der Druck wurde über Sensormatten des US-amerikanischen Herstellers TEKSCAN über bis zu 9 152 Messzellen registriert und zur weiteren analytisch-statistischen Auswertung gespeichert. Die Radlasten wurden in einem eigens für diese Zwecke gebauten Simulator hydraulisch zwischen 10 und 50 kN (in Zehnerstufen) erzeugt; in jeder Auflaststufe wurde der Reifenfülldruck auf 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0 und 5,0 bar abgestimmt. Die sieben Fülldruck- und fünf Radlaststufen führten dann bei den 70 Rädern zu 2 450 zu interpretierenden Druckverteilungen.

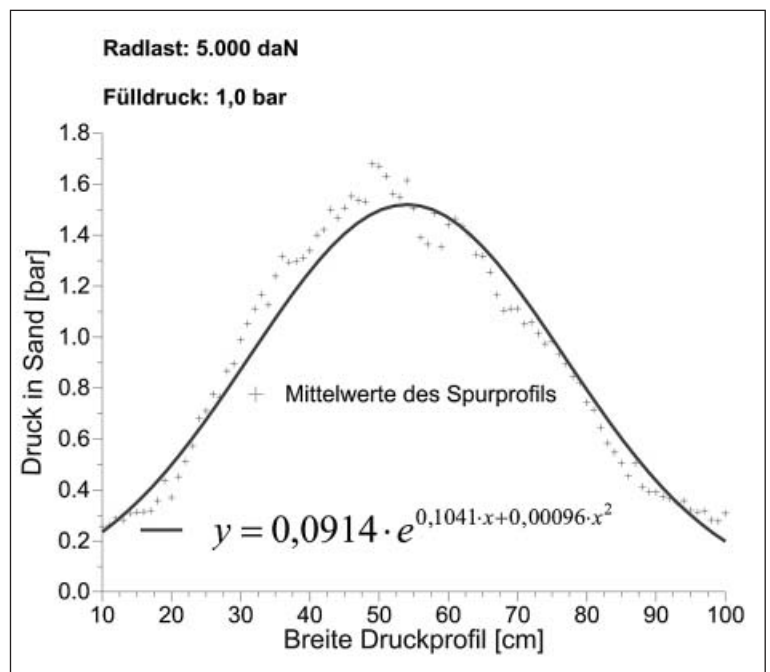
Ergebnisse

Sämtliche Messungen unter der Sandschicht führten zu Druckverteilungen, die der in *Bild 1* dargestellten Glocke ähneln.

Das Gebilde entspricht letztlich einem Horizontalschnitt durch die Druckzwiebel in einem sandigen Boden. Diese dreidimensionale Druckverteilung lässt sich charakterisieren durch die (dann zweidimensionalen) Scheiteltlocken in der Breitenausprägung des Reifens einerseits und in Abroll- oder Fahrtrichtung andererseits. Die Scheitel-

Bild 2: Mittelwerte und Ausgleichsglocke des in Breitenausprägung gemittelten Druckes für den Versuchsreifen N30

Fig. 2: Mean values and fitted curve of lateral average pressure for experimental tire N30



glocken wiederum folgen dem Funktionsmodell

$$y = a \cdot e^{b \cdot x + c \cdot x^2} \quad (1)$$

Die Logarithmierung (zur Basis der Eulerschen Zahl e) der Funktion führt zu

$$\ln y = \ln a + b \cdot x + c \cdot x^2 \quad (2)$$

einer Gleichung also, die in diesem transformierten Stadium als Polynom zweiten Grades in x behandelt werden kann. Sowohl die Druckwerte in Breitenausprägung als auch die in der Abrollrichtung der Räder lassen sich somit über eine (eigentlich) lineare Zweifachregression ausgleichen und anschließend aus Modellgleichung (2) in die „Glocken-Gleichung“ (1) retransformieren. Dieser Ausgleich gelingt mit einer Anpassungsgüte von im Mittel $\sim 90\%$ (beurteilt über das Bestimmtheitsmaß R^2 im logarithmierten Stadium). Den Effekt illustriert exemplarisch *Bild 2*.

Verschiebt man in einem nächsten Schritt den Ursprung des (kartesischen) Koordinatensystems rechnerisch unter den Glockenscheitel, so verschwindet der Gleichungsparameter ‚ b ‘ und Parameter ‚ a ‘ quantifiziert die Ordinate des Scheitelwertes, also den (ausgeglichenen) Spitzendruck. Parameter ‚ c ‘, der Koeffizient beim quadrierten x , kennzeichnet nunmehr allein die Breitenausprägung jener Verteilungsglocken. Somit gelingt es, die Verteilungen des Kontaktflächendruckes unter einem Rad durch lediglich zwei Zahlen (a und c) bei ausgezeichneter Anpassungsgüte zu beschreiben.

Das so umrissene arithmetische Procedere kann mit identischer Ausgleichsqualität so-

wohl für in den Hauptrichtungen gemittelte Druckwerte als auch für maximale Ausprägungen des Druckes (letztendlich die „Schattenrisse“ der gemessenen Drücke in Reifenbreite und Abrollrichtung) vorgenommen werden; die Ausgleichspitzen der Maximaldrücke liegen um den Faktor 2,7 über denen der (arithmetisch) gemittelten Werte.

Ergündet man in einem nächsten Schritt die aus dem Betriebszustand und der Reifenkonstruktion stammenden Einflussfaktoren auf die Parameter a und c der maximalen Druckverteilungen, so kann man dies beispielsweise über eine covarianzanalytisch ausgerichtete autoselektive Regression angehen. Blendet man in einem solchen Modell die zwar noch signifikanten, aber in der Erklärungsgüte minimalen Faktoren aus (also solche, deren Zuwachs im Bestimmtheitsmaß des Modells sich nur noch im Promillebereich bewegt), so führt dies zu den in der Tabelle aufgeführten (sehr plausiblen) Abhängigkeiten.

Ausblick

Bei Kenntnis der (an anderer Stelle publizierten) Regressionskoeffizienten der Modellgleichungen lassen sich die Verteilungskurven der Kontaktflächendrucke für das Forstreifenkollektiv abschätzen. Die Bestimmtheitsmaße für die Prognose der Parameter bewegen sich immerhin zwischen stattlichen 70 und 80 %.

Ferner untersuchen wir derzeit, inwiefern eine arithmetische Verknüpfung der Parameter a und c Rückschlüsse auf das Traktionsverhalten der Reifen und auf bodenökologisch wirksame Konsequenzen gestattet. Sollten solche Verknüpfungen zu in dieser Hinsicht validen Kennziffern führen, so könnte das hier umrissene Verfahren einen Ansatz zur einschlägigen Bewertung von Reifen liefern – und das über den forsttechnischen Sektor hinaus.

Tab. 1: Einflussfaktoren auf die Parameter der e-Funktion (das Einflusspotenzial entspricht der Rangfolge der Faktoren)

Table 1: Factors influencing the parameters of e-function (ranking according to the influence)

Parameter	a (Druckmaximum)	c in Richtung Reifenbreite	c in Abrollrichtung
Faktor 1	Radlast	Nennbreite	Radlast
Faktor 2	Fülldruck	Fülldruck	Fülldruck
Faktor 3	Nennbreite	Radlast	Raddurchmesser
Faktor 4			Nennbreite