

Zur Abschätzung von Bodenspannungen unter landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen

Die technische Entwicklung in der Landwirtschaft tendiert zu immer schwereren und leistungsfähigeren Maschinen, wobei deren Reifengröße und -form über die Tiefenwirkung der Druckfortpflanzung in Abhängigkeit von Bodentyp und hydraulischen Verhältnissen entscheiden. Mithilfe von Nomogrammen kann die Form der Druckfortpflanzung für gegebene Bodeneigenschaften und Lastflächen sowie Maschinenmassen ermittelt werden. Damit können die auch im Bauwesen eingeführten Bemessungsverfahren zur Dokumentation von Form und Tiefenausbreitung der Drücke ebenso wie zur Entscheidungsfindung beim Maschineneinsatz oder Neukauf von Geräten/Reifen verwendet werden.

Dipl.-Geol. Stephan Peth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian Albrechts-Universität (CAU) zu Kiel, Olshausenstr. 40, 24118 Kiel; e-mail: s.peth@soils.uni-kiel.de.

Prof. Dr. Rainer Horn ist Professor für Bodenkunde und Direktor des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde der CAU zu Kiel.

Schlüsselwörter

Maschinenmasse, Reifengröße, Druckausbreitung

Keywords

Stress distribution, subsoil compaction, tyre size, machine loads

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 04511 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/lo-cal/fliteratur.htm> abrufbar.

Der mit dem Strukturwandel in der Landwirtschaft einhergehende Trend zu immer größeren und leistungsfähigeren Maschinen stellt nicht nur höhere Anforderungen an die technische Entwicklung [1], sondern auch an die Belastbarkeit des Bodens, der als nicht vermehrbare Produktionsgut zunehmend größere Maschinenmassen tragen muss. Der Tragfähigkeit des Bodens sind im Hinblick auf den Erhalt von für das Pflanzenwachstum wichtigen Bodenfunktionen jedoch natürliche Grenzen gesetzt, die nach DIN V 19688 [2] durch den Begriff der Vorbelastung definiert sind. Um das Risiko für schädliche Bodenverformungen in der landwirtschaftlichen Praxis beurteilen zu können, sind neben der Vorbelastung als Stabilitätskennwert zusätzlich die über die Tiefe zu erwartenden Zusatzspannungen im Lastfall zu ermitteln. Die Modellierung hat diesbezüglich in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht; allerdings ist die Anwendung entsprechender Modelle, etwa der Finiten Elemente Methode (FEM), Praktikern in der Regel nicht zugänglich. Mit Hilfe von Nomogrammen ist es jedoch möglich, auf einfache Weise die Spannungsverteilung unterhalb von Flächenlasten in Form der so genannten „Druckzwiebel“ grafisch zu ermitteln, was an vier verschiedenen Lastfällen beispielhaft erläutert wird.

Ermittlung der Spannungsverteilung unterhalb von Radlasten

Theorie

Die Theorie über die Druckspannungsverteilung im Untergrund geht auf Boussinesq [3] zurück, dessen Spannungsgleichung von Fröhlich [4] zur Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenfestigkeiten durch den so genannten Konzentrationsfaktor v_k erweitert wurde. Konzentrationsfaktoren liegen für die meisten Böden zwischen 3 (=äußerst stabil) und >5 (geringe Festigkeit) [5], wobei mit zunehmendem Konzentrationsfaktor die Spannungen um die Lotrechte der Lastachse konzentriert werden und demzufolge tiefer in den Untergrund reichen. Spannungen unter Flächenlasten ergeben sich durch die Integration der Boussinesq- beziehungsweise

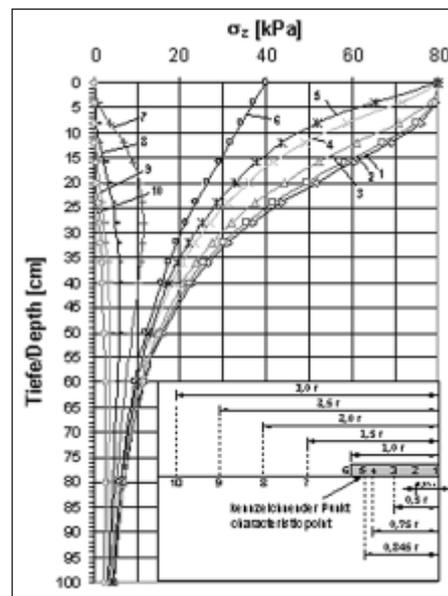


Bild 1: Tiefenverteilungsfunktionen der vertikalen Bodenspannungen (σ_z) in verschiedenen Abständen (Punkt 1-10) zum Lastzentrum einer kreisförmigen Auflastfläche. Punkt 1 = Lastzentrum, Punkt 6 = Reifenaußenkante, Punkt 10 = ein Reifendurchmesser Abstand von der Reifenaußenkante

Fig. 1: Vertical soil stresses (σ_z) as a function of depth for different distances from the load centre of a circular load. Point 1 = load centre, point 6 = edge of tyre, point 10 = one tyre-diameter distance from the edge of the tyre

se Fröhlich-Lösung (Superpositionsprinzip). Um die Berechnungen zu vereinfachen, bedient man sich häufig Nomogrammen oder Tabellenwerten [6].

Näherungsweise lässt sich die Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden durch eine Kreisfläche beschreiben, wodurch eine rechentechnisch aufwendige Summation der Spannungswerte, wie sie unter beliebig geformten Lastflächen notwendig ist (Verfahren nach Newmark [7] oder Söhne [8]), entfällt. Grasshoff [9] gibt für den Fall einer schlaffen, gleichmäßig verteilten Kreislast so genannte Einflusswerte an, mit deren Hilfe sich die lotrechten Spannungen für verschiedene Punkte unterhalb sowie außerhalb der Belastungsfläche errechnen lassen (Tab. 1). Schlaffe Flächenlasten (= keine Biegesteifigkeit) unterscheiden sich von starren

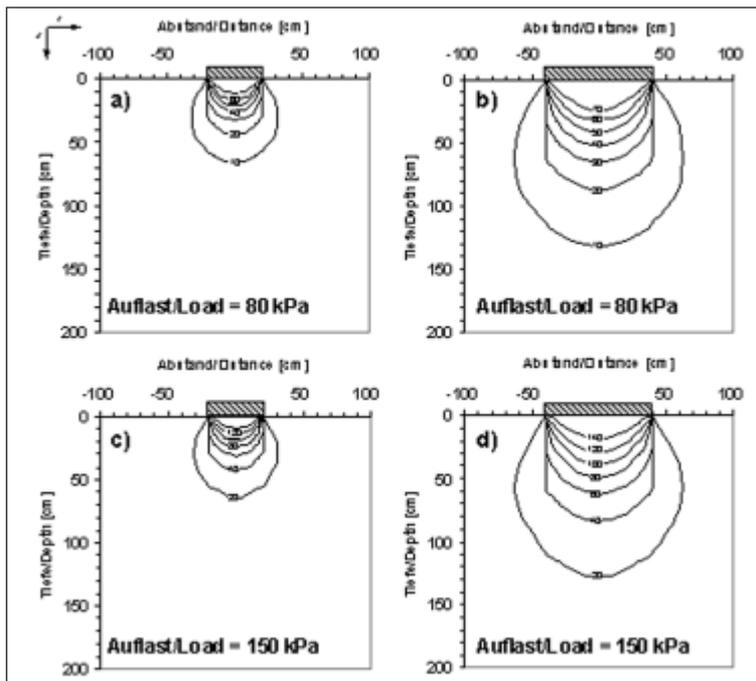
Flächenlasten (= unendliche Biegesteifigkeit) zwar durch eine unterschiedliche Spannungsverteilung im Untergrund, das Einsinken des Lastkörpers ist jedoch im so genannten kennzeichnenden Punkt (Kreislast = $0,845 \cdot \text{Radius}$) für beide Lastfälle gleich groß, so dass auf die Spannungen im kennzeichnenden Punkt einer schlaffen Last zurückgegriffen werden kann [10].

Vorgehensweise

Zunächst werden mit Hilfe der Einflusswerte i aus Tabelle 1 die Vertikalspannungen in verschiedenen Abständen zur Lastachse für unterschiedliche Verhältnisse von Tiefe zu Radius der Lastfläche (z/r) berechnet und als Tiefenfunktion dargestellt (Bild 1). Dabei ergibt sich die Vertikalspannung σ_z bei gegebener Auflast p (Kontaktflächendruck) zu $\sigma_z = i \cdot p$ und bei bekanntem Reifenradius r die der Vertikalspannung entsprechende Tiefe zu $z = (z/r) \cdot r$. Um aus dem Nomogramm (Bild 1) die Druckzwiebel grafisch zu bestimmen, wählt man geeignete Isobaren wie 10, 20, 30, ... kPa und liest für jede Kurve die Tiefe ab, in der diese Spannung herrscht. Die Tiefen und die dazugehörigen Abstände zur Lastachse stellen die Koordinaten verschiedener Punkte gleicher Vertikalspannung in der r,z -Ebene dar, die sich schließlich zur gesuchten Spannungsisobare verbinden lassen (Bild 2a). Aus Symmetriegründen können die Isobaren an der Lotrechten in der Lastachse gespiegelt werden, wodurch man das typische Bild der Druckzwiebel erhält. Analog lassen sich für verschiedene Auflasten (Kontaktflächendrücke) bei unterschiedlichen Durchmessern der Lastfläche (Reifendurchmesser) weitere Nomogramme aufstellen, mit deren Hilfe die Druckzwiebel für

Bild 2: Druckzwiebeln (Isobaren in kPa) für verschiedene Radlasten und Kontaktflächendurchmesser. a) Radlast = 1 t, $\varnothing = 40$ cm; b) Radlast = 4 t, $\varnothing = 80$ cm; c) Radlast = 1,9 t, $\varnothing = 40$ cm; d) Radlast = 7,5 t, $\varnothing = 80$ cm

Fig. 2: Isobaren (values in kPa) of vertical soil stresses for different wheel loads and tyre diameters. a) wheel load = 1 t, $\varnothing = 40$ cm; b) wheel load = 4 t, $\varnothing = 80$ cm; c) wheel load = 1,9 t, $\varnothing = 40$ cm; d) wheel load = 7,5 t, $\varnothing = 80$ cm



jede gewünschte Fahrzeugdimensionierung (Radlast, Reifenkontaktfläche) ermittelt werden kann (Bild 2b, c, d).

Einfluss der Auflast und Reifenkontaktfläche auf die Spannungsverteilung

Es ist deutlich zu sehen, dass bei gleichem Kontaktflächendruck mit größer werdender Lastfläche (Reifendurchmesser) die Druckzwiebel tiefer in den Boden reicht (Bild 2). Unterhalb der Pflugsohle (> 30 cm) steigen die Bodenspannungen bei einer Radlast von ~ 4 t und einem Reifendurchmesser von 80 cm auf ~ 60 kPa (Bild 2b) und bei einer Rad-

last von $\sim 7,5$ t sogar auf ~ 110 kPa (Bild 2d) an. Damit werden nach DIN V 19688 [2] im ersten Fall lediglich als sehr gering stabile eingestufte Böden, im zweiten Fall jedoch auch als mittel bis hoch stabil eingestufte Böden unterhalb der Pflugsohle plastisch und damit irreversibel verformt.

Fazit

Nomogramme dienen der einfachen Abschätzung von Bodenspannungen unterhalb eingesetzter oder einzusetzender Landmaschinen. Die berechneten Druckzwiebeln zeigen deutlich die Grenzen der Steigerung der Radlasten auch bei gleich bleibendem Kontaktflächendruck, also bei proportional mit der Radlast größer werdender Aufstandsfläche. Das über die größere Fläche abgetragene Gewicht der Maschine wird auf ein größeres Bodenvolumen und damit in eine größere Tiefe verteilt. Bei Überschreiten der Bodenstabilität können dadurch Boden-zonen irreversibel verdichtet werden, die im Zuge der gängigen Bearbeitungsverfahren mit dem Pflug nicht mehr gelockert werden können und somit in ihrer Funktion nachhaltig gestört sind. Die Folge kann eine geringere Durchlässigkeit des Untergrundes und ein damit verbundener Wasserstau sein, der den Zeitraum mit für eine Befahrung günstigen Bodenverhältnissen weiter einschränkt.

Tab. 1: Einflusswerte i für die lotrechten Spannungen in verschiedenen Abständen zur Lastachse für verschiedene Verhältnisse von Tiefe z zu Radius der Lastfläche r unter einer schlaffen, gleichmäßig verteilten Kreislast (nach Grasshoff [9]). Elastisch-isotroper Halbraum, $\nu_k = 3$

Table 1: Influence values for determining the vertical soil stress at different distances to the load axis for different depth to radius ratios of a non-rigid equally distributed circular load (after Grasshoff [9]). Elastic-isotropic soil, $\nu_k = 3$

z/r	$i = \sigma_z/p$									
	$0 r$	$0,25 r$	$0,5 r$	$0,75 r$	$0,845 r$	$1,0 r$	$1,5 r$	$2,0 r$	$2,5 r$	$3,0 r$
0,2	0,992	0,990	0,977	0,898	0,817	0,465	0,011	0,001	0,0002	0,0001
0,4	0,949	0,963	0,885	0,735	0,650	0,430	0,047	0,006	0,0016	0,0006
0,6	0,864	0,840	0,766	0,615	0,546	0,397	0,087	0,016	0,0048	0,0017
0,8	0,756	0,727	0,652	0,523	0,470	0,363	0,115	0,028	0,0097	0,0037
1,0	0,646	0,619	0,553	0,449	0,409	0,330	0,132	0,041	0,0157	0,0064
1,2	0,547	0,523	0,469	0,388	0,358	0,298	0,140	0,052	0,0222	0,0097
1,4	0,460	0,442	0,400	0,337	0,314	0,269	0,142	0,061	0,0283	0,0132
1,6	0,390	0,374	0,342	0,294	0,276	0,241	0,140	0,067	0,0337	0,0167
1,8	0,332	0,319	0,295	0,258	0,244	0,217	0,135	0,071	0,0383	0,0200
2,0	0,284	0,274	0,256	0,227	0,216	0,195	0,129	0,073	0,0418	0,0230
2,5	0,200	0,193	0,184	0,168	0,162	0,150	0,111	0,072	0,0466	0,0286
3,0	0,146	0,142	0,137	0,128	0,124	0,118	0,093	0,067	0,0471	0,0315
4,0	0,087	0,085	0,084	0,080	0,078	0,076	0,066	0,052	0,0419	0,0316
5,0	0,057	0,056	0,056	0,054	0,053	0,052	0,047	0,041	0,0346	0,0282