

Quantitative Bewertung der Bodenbelastung durch Radfahrwerke

Dr.-Ing. A. Rüdiger, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A	cm ²	Aufstandsfläche
D	mm	Außendurchmesser des Reifens
DW	N/mm ²	Durchdringungswiderstand
F _N	kN	Radlast
H		Überrollhäufigkeit
p	kPa	Kontaktflächendruck
p _i	kPa	Reifeninnendruck
p _m	kPa	mittlerer Kontaktflächendruck
T	mm	Tiefe
v _f	km/h	Fahrgeschwindigkeit

1. Problemstellung

Zur Vermeidung schädlicher Bodenverdichtungen sind neben anderen acker- und pflanzenbaulichen sowie technologischen Maßnahmen auch die Bodenbelastung durch die Fahrwerke der Mechanisierungsmittel drastisch zu senken. Aus vielfältigen Untersuchungen ist die Bedeutung der Parameter Radlast, Reifeninnendruck und Überrollhäufigkeit für die Bodenverdichtung bekannt, ohne daß mit diesem Erkenntnisstand unterschiedliche Fahrwerksvarianten quantitativ bewertet werden konnten.

In systematischen experimentellen Untersuchungen wurde deshalb die komplexe Wirkung der Parameter Radlast, Reifeninnendruck und Überrollhäufigkeit auf die Bodenverfestigung untersucht und daraus ein empirisches Modell zur vergleichenden Bewertung der Bodenbelastung durch Radfahrwerke abgeleitet [1].

2. Mittel und Methoden

Ausgehend von den z. Z. üblichen und in Zukunft zu erwartenden Fahrwerksparametern wurden für diese Untersuchungen die Variationsbereiche für die Radlast von 6 bis 37 kN, für den Innendruck von 50 bis 350 kPa und für die Überrollhäufigkeit von 2 bis 14 festgelegt.

Für diese drei Haupteinflußgrößen wurde ein dreifaktorieller statistischer Versuchsplan erstellt (Bild 1). In jeder Versuchsreihe waren danach 27 Versuche durchzuführen. Für jede Last-Innendruck-Kombination des Versuchsplans wurde ein geeigneter Reifen ausgewählt. Für die Auswahl galt die Bedingung,

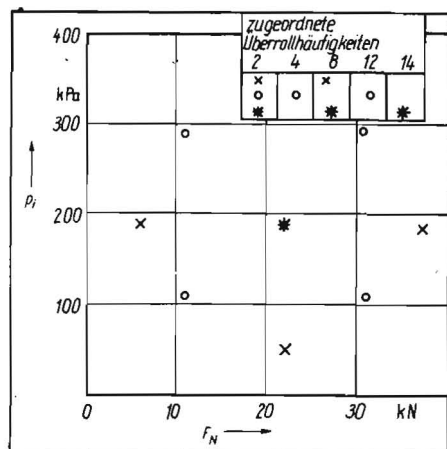


Bild 1. Dreifaktorieller Versuchsplan für die systematische Untersuchung des Einflusses der Radlast, des Reifeninnendruckes und der Überrollhäufigkeit

daß mit diesen Parametern der Reifen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h ausgelastet ist, d. h., daß die Radlast gerade den zulässigen Tragfähigkeitsangaben im Reifenkatalog entspricht. Für die Hauptversuche wurde weiterhin festgelegt, daß die Meßplätze nur von den zu untersuchenden Rädern in der erforderlichen Häufigkeit überrollt werden, ohne daß dabei Triebkräfte aufgebracht werden. Zum Nachweis der Fahrwerkswirkung auf den Boden wurde die Veränderung des Durchdringungswiderstands mit einem Kegelpenetrometer (Kegeldurchmesser 12,8 mm nach ASAE-Standard) bis in eine Tiefe von 520 mm unter der Spur ermittelt. Diese Meßmethode ist vorzugsweise für die Untersuchung der Verdichtung lockerer sandiger Böden geeignet. Die ermittelten Durchdringungswiderstände korrelieren bei konstanter Bodenfeuchte mit der Trockenrohichte [2].

Um entsprechend lockere Ausgangsbedingungen auch im krumennahen Unterboden zu gewährleisten, wurden in Vorbereitung der Versuche die Meßplätze bis in eine Tiefe von rd. 700 mm ausgeschachtet, beim Verfüllen gesiebt und leicht vorverdichtet. Dadurch wurden die häufig vorhandenen Schadverdichtungen im krumennahen Unterboden beseitigt. Aufgrund dieser Ausgangsbedingungen konnten die Voraussetzungen für den gesicherten Nachweis der Fahrwerkswirkungen geschaffen werden. Im Ausgangszustand betragen die Trockenrohichte rd. 1,3 bis 1,4 g/cm³ und der Durchdringungswiderstand 0,5 bis 0,7 N/mm². Wegen des hohen Aufwands für die Meßplatzvorbereitung mußte auf eine Wiederholung der Versuche innerhalb einer Versuchsreihe verzichtet werden. Insgesamt wurden im Rahmen der Forschungsleistung 7 Versuchsreihen auf Sandboden und lehmigem Sandboden durchgeführt. Für jede F_N-p_i-H-Kombination wurde der Durchdringungswiderstand mit mindestens 12 Wiederholungen im Spurbereich ermittelt.

Bei der Darstellung der Ergebnisse beziehen sich die Tiefenangaben stets auf die Spursole, und in den Bildern werden die Vertrauensbereiche der Mittelwerte dargestellt (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%).

3. Ergebnisse der Durchdringungswiderstandsmessungen

Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse kann die Durchdringungswiderstandsmessung als gut geeignet zur Quantifizierung der Veränderung des Packungszustands von sandigen Böden eingeschätzt werden. Besonders hervorzuheben ist die große Auflösung, die das Meßprinzip ermöglicht. Bedingt durch die geringe Ausgangsfestigkeit und die aus der Meßplatzvorbereitung resultierende geringe Streuung konnten signifikante Unterschiede zwischen den Fahrwerksvarianten bei einem vertretbaren Stichprobenumfang nachgewiesen werden. Die Bewertung der Bodenbelastung unterschiedlicher Fahrwerksvarianten anhand der gemessenen absoluten Durchdringungswiderstände ist nur innerhalb einer Versuchs-

serie (gleiche Versuchsbedingungen) möglich. Um eine ausreichende Verallgemeinerungsfähigkeit der Ergebnisse zu sichern, sollten Fahrwerksuntersuchungen stets unter verschiedenen Versuchsbedingungen wiederholt werden.

An einigen typischen Durchdringungswiderstandsprofilen läßt sich die Wirkung der Radlast und des Innendruckes auf die Bodenverfestigung erläutern (Bild 2).

Ein Reifen mit einer großen Radlast (31 kN) und einem hohen Reifeninnendruck (290 kPa), wie er z. B. am Anhänger HW80.11 verwendet wird, führt zu sehr hohen Bodenverfestigungen im gesamten untersuchten Tiefenbereich. Ein ausgeprägtes Maximum wird in dieser Versuchsreihe mit einem Durchdringungswiderstand von 2,9 bis 3,2 N/mm² in einer Tiefe von rd. 200 bis 300 mm erreicht. Mit zunehmender T₁ geht die Verfestigung deutlich zurück. Wird die gleiche Radlast mit einem wesentlich größeren Reifen abgestützt (z. B. dem Reifen 725-665P, der am Traktor K-700A verwendet wird) kann der Reifeninnendruck auf rd. 110 kPa abgesenkt werden. Durch diese drastische Innendruckabsenkung nimmt die Bodenbelastung im gesamten untersuchten Tiefenbereich stark ab. Die maximale Bodenverfestigung ist mit einem Durchdringungswiderstand von 1,6 bis 1,8 N/mm² um fast 50% geringer als bei der Variante mit dem hohen Reifeninnendruck. Auch im Bereich des krumennahen Unterbodens führt die Innendruckabsenkung bei lockeren Ausgangsbedingungen zu einer deutlichen Verminderung der Bodenverfestigung. Die dritte im Bild 2 eingetragene Kurve verdeutlicht den Effekt verminderter Radlasten bei niedrigem Innendruck. Wird eine geringe Radlast von 11 kN mit dem Reifen 12,4-38 abgestützt, ist ein Innendruck von ebenfalls 110 kPa einzustellen. Für diese Variante wurde erdungsgemäß im gesamten Tiefenbereich die geringste Bodenfestigkeit ermittelt. Die Verringerung der Bodenverfestigung durch die Radlastreduzierung ist im Vergleich zur Wirkung der Innendruckreduzierung jedoch relativ gering.

Die komplexe Wirkung der Parameter Radlast, Innendruck und Überrollhäufigkeit ist gut in den Bildern 3 und 4 erkennbar, in denen für zwei Tiefenbereiche (Krumen- und Unterboden) bei konstanten Radlasten bzw. bei vergleichbaren Innendrücken die gemessenen Bodenverfestigungen gegenübergestellt wurde. Als erstes wird aus den Bildern der wesentliche Einfluß der Überrollhäufigkeit auf die Bodenverfestigung bei allen Fahrwerksvarianten sichtbar. Die größte Zunahme tritt bei den lockeren Ausgangszuständen bereits bei geringen Überrollhäufigkeiten (H = 1...4) auf. Bei mehr als 8 bis 10 Überrollungen ist keine wesentliche Zunahme der Verfestigung mehr zu verzeichnen.

Durch die drastische Reduzierung des Innendruckes wird der Grad der Verfestigung sowohl in der Krume als auch im Unterboden in gleichem Maß beeinflusst. Dagegen führt die Erhöhung der Radlast in der Krume nur

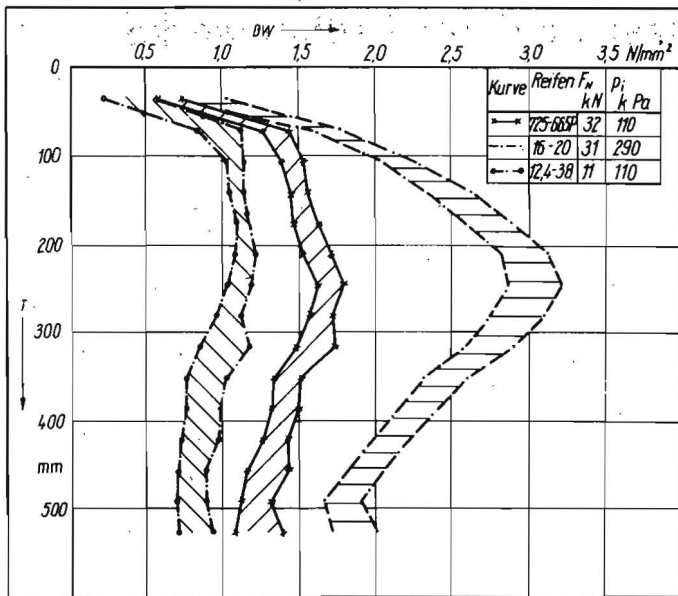


Bild 2. Abhängigkeit des gemessenen Durchdringungswiderstands von der Tiefe für drei Fahrwerke mit sehr unterschiedlichen Parametern (Konfidenzbereiche mit $\alpha = 5\%$; Serie F 87 D, H = 4)

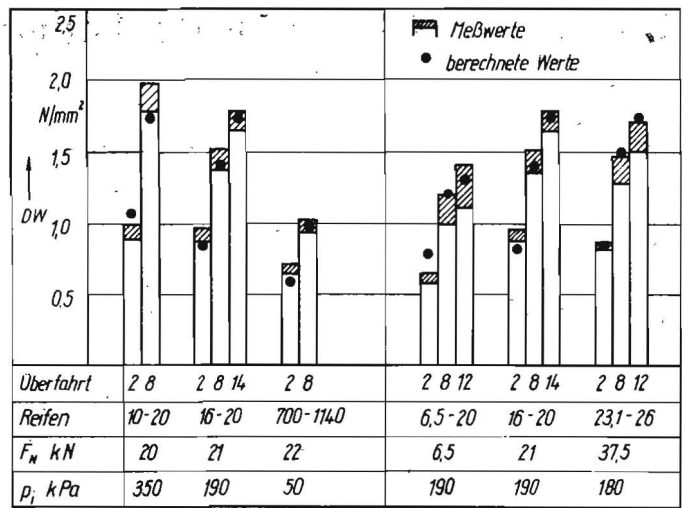
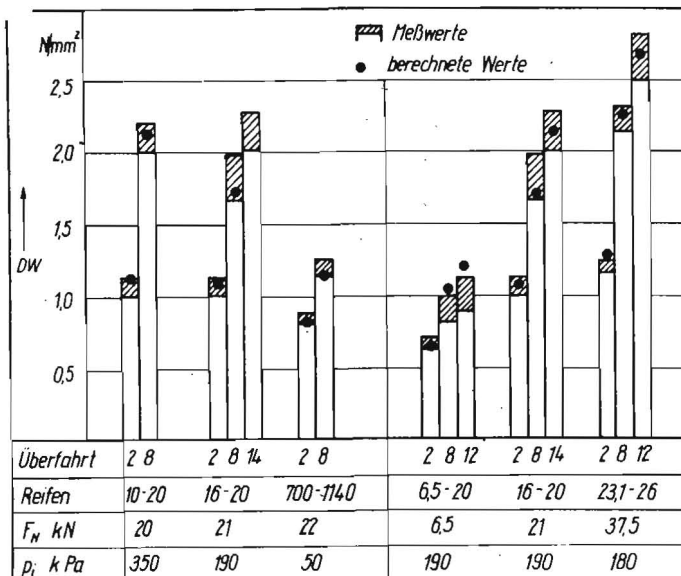


Bild 3. Abhängigkeit des Durchdringungswiderstands vom Innendruck und von der Überrollhäufigkeit bei konstanter Radlast (linker Teil) bzw. von der Radlast und der Überrollhäufigkeit bei vergleichbarem Innendruck (rechter Teil) in einer Tiefe von 140 mm unter der Spursohle; Bodenart lehmiger Sand, Bodenfeuchte 9,5% (Masseanteil), Serie F 87 D



zu einer geringen im Unterboden jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des Durchdringungswiderstands. An diesen Beispielen wurden die qualitativen Abhängigkeiten der Bodenverfestigung von den wichtigsten Fahrwerksparametern veranschaulicht. Um die komplexe Wirkung der Parameter quantitativ bewertbar machen zu können, wurde durch eine regressionsanalytische Aufbereitung der Meßwerte ein empirisches Modell erarbeitet. Dabei wurden die Ergebnisse aller 7 Versuchsserien einbezogen, wodurch die Verallgemeinerungsfähigkeit des Modells wesentlich erhöht werden konnte. Auf Grundlage dieses Modells wurde ein Computerprogramm erarbeitet, mit dem die Bodenbelastung verschiedener Fahrwerke bereits in der Konzeptionsphase vergleichend bewertet werden kann. Die bisher dargestellten Ergebnisse gelten für ausgelastete Reifen. Dieser Fall tritt in der Praxis jedoch selten auf, da z. B. die Radlast an Transportfahrzeugen durch die Zuladung stark schwankt. In ergänzenden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß der Auslastungsgrad eines Reifens keinen wesentlichen Einfluß auf die Bodenbelastung

hat. Dieser Effekt ist aus dem Verformungsverhalten der Reifen zu erklären [3]. Bei einem Luftreifen hängt die Größe der Aufstandfläche bei konstantem Innendruck annähernd linear von der Radlast ab (Bild 5). Dadurch bleibt der mittlere Kontaktflächen- druck auch bei unterschiedlichen Radlasten annähernd konstant. Die Größe der Bodenbelastung wird somit vorrangig von der aktuellen Radlast und dem eingestellten Innendruck bestimmt. Diese Zusammenhänge gelten jedoch nur für Reifen, die ihrem vorgesehenen Verwendungszweck entsprechend eingesetzt werden. Wird dagegen ein steifer Reifen, der für den Einsatz bei großen Lasten mit hohem Innendruck vorgesehen war, mit niedrigem Luftdruck eingesetzt, wird ein größerer Teil der Last durch die Eigensteifigkeit des Reifens abgestützt, und der mittlere Kontaktflächen- druck wird deutlich höher sein als der Innendruck. Daraus folgt u. a., daß der Reifen 18,4-34 (14PR) vom Mähdröschler möglichst nicht als Zwillingsrad für die Hinterachse des Traktors ZT 320/323 verwendet werden sollte. Für diesen Einsatzzweck ist der weichere Radialreifen 18,4 R34 wesentlich besser geeignet.

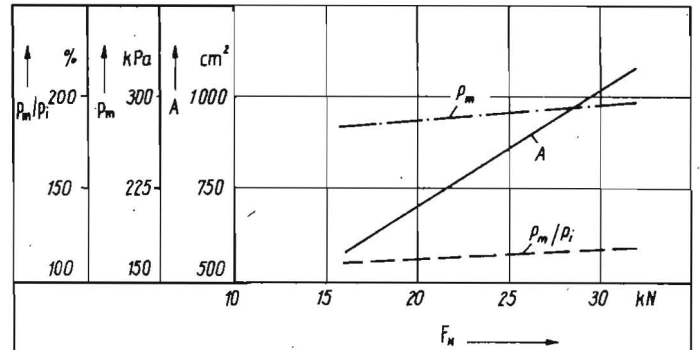


Bild 5. Veränderung der Aufstandfläche, des mittleren Kontaktflächen- drucks und des Verhältnisses von mittlerem Kontaktflächen- druck und Innendruck in Abhängigkeit von der Radlast bei einem konstanten Innendruck von 250 kPa für den Reifen 16-20 14 PR

Bild 4. Abhängigkeit des Durchdringungswiderstands vom Innendruck und von der Überrollhäufigkeit bei konstanter Radlast (linker Teil) bzw. von der Radlast und der Überrollhäufigkeit bei vergleichbarem Innendruck (rechter Teil) in einer Tiefe von 350 mm unter der Spursohle; Bodenart Unterboden Sand, Bodenfeuchte 10,5% (Masseanteil), Serie F 86 D

4. Bewertung ausgewählter Fahrwerkslösungen

Ausgehend von den dargestellten grundlegenden Zusammenhängen der Wirkung der Radparameter sollen nun noch einige Entwicklungsrichtungen für bodenschonende Fahrwerkskonzeptionen abgeleitet und bewertet werden.

Für die Minderung der Bodenbelastung in der Krume hat die drastische Reduzierung des Reifeninnendruckes die entscheidende Bedeutung. Wird beispielsweise die Bodenverfestigung in der Spur nach einer zweifachen Überrollung mit den Reifen 16-20 bei einer Radlast von 300 kPa (entspricht etwa dem Anhängers HW 80.11) als 100% gesetzt, so kann die Bodenverfestigung durch die Verwendung eines wesentlich größeren Reifens, der eine Reifeninnendruckabsenkung bei dieser Last auf 75 kPa ermöglicht, auf rd. 60% im gesamten Tiefenbereich vermindert werden (Bild 6). Häufig stehen aber derartige große Reifen nicht zur Verfügung oder sie können wegen des nicht vorhandenen Bau- raums an der Maschine bzw. der zu großen Breite beim Einsatz in Reihenkulturen nicht

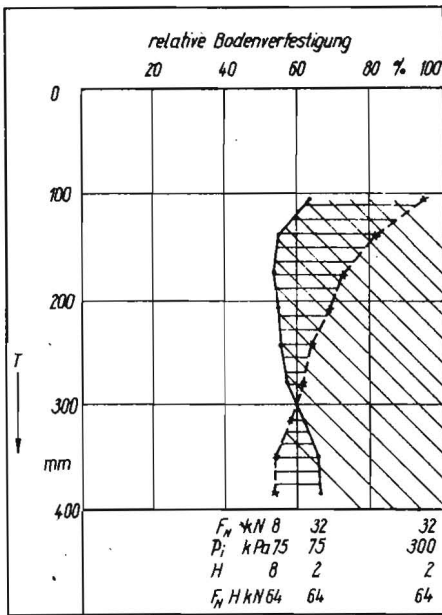


Bild 6. Gegenüberstellung der möglichen Minderung der Bodenverfestigung durch die Senkung des Reifeninnendrucks bzw. durch die Senkung des Reifeninnendrucks und der Radlast, wobei die Überrollhäufigkeit proportional erhöht wurde (Gesamtlast 64 kN)

angewendet werden. In diesen Fällen kann die gleiche Gesamtmasse auf mehreren kleinen Rädern an Mehrachs- oder Tandemfahrzeugen abgestützt werden. Durch die damit verbundene wesentliche Verminderung der Radlast werden auch mit den heute gebräuchlichen Reifenabmessungen niedrige Reifeninnendrucke möglich. Die Untersuchung der daraus resultierenden Bodenverfestigung zeigt, daß bei lockeren Ausgangszuständen durch die Variante mit größerer Überrollhäufigkeit aber niedriger Radlast gegenüber dem Fahrwerk mit der hohen Radlast, aber geringer Überrollhäufigkeit bei gleichem Reifeninnendruck im Krumbereich

keine weitere Verminderung der Bodenverfestigung auftritt. Nur im krumbenahen Unterboden geht die Belastung durch die geringe Radlast zurück (Bild 6).

Eine weitere Minderung der Belastung im Spurbereich tritt dagegen auf, wenn die zusätzlichen Räder nicht in einer Spur, sondern in einer zweiten als Zwillingsräder angebracht werden können. In speziellen Untersuchungen [3, 4] konnte nachgewiesen werden, daß zur Bewertung der Bodenbelastung durch gleichgroße Zwillingsräder im Krumbereich jedes Rad als Einzelrad wirkt und somit von einer Halbierung der Gesamtlast ausgegangen werden kann (Bild 7). Das durch Zwillingsreifen erreichbare Belastungsniveau hängt nunmehr wieder von der Gesamtlast und den verwendeten Reifen ab. Zur Verdeutlichung sollen die Effekte der Zwillingsbereifung an der Hinterachse des Traktors ZT320 (Radlast mit Anbaugerät 25 kN) mit denen an der Vorderachse des Traktors K-700A (Radlast 46 kN) und denen an der Hinterachse des LKW W50 verglichen werden (Bild 8). Wird die Bodenbelastung des solobereiften ZT320 mit 100 % angenommen, so führt die Zwillingsbereifung (Reifeninnendruck 80 kPa) zu einer Belastungsminderung auf 75 bis 80 %. Unter dem einzelnen Rad des Traktors K-700A erreicht die Bodenbelastung 120 % (Krume) bis 150 % (Unterboden). Die Zwillingsbereifung am Traktor K-700A führt zu einer wesentlichen Minderung der Belastung, die nur noch 80 bis 90 % des solobereiften ZT320 beträgt. Auch am LKW W50 führt die Zwillingsbereifung zu einer wesentlichen Belastungsminderung. Allerdings kann bei Verwendung der Reifen 16-20 der Innendruck nur auf rd. 175 kPa herabgesetzt werden. Deshalb entspricht das Belastungsniveau unter diesem Zwillingsrad in etwa nur dem, das unter dem Solorad am ZT320 auftritt.

Bei diesen Betrachtungen zur Bodenbelastung unter Zwillingsrädern blieb bisher unberücksichtigt, daß in den meisten Fällen die Spurbreite der vorauslaufenden Lenkräder nicht der der Zwillingsräder entspricht, wo-

durch die Lastverteilung zwischen den Einzelrädern der Zwillingsbereifung ungünstig beeinflusst wird. Außerdem wird das durch Zwillingsräder beeinflusste Bodenvolumen größer. Aus konstruktiver Sicht führt die Verwendung von Zwillingsrädern zu höheren Achsbelastungen und größeren Gesamtbreiten der Fahrzeuge.

Für die Entwicklung bodenschonender Fahrwerke ergibt sich daraus die Konsequenz, möglichst weiche Breitreifen mit geringem Innendruck einzusetzen. Eine wesentliche Voraussetzung wäre dafür die Bereitstellung eines Mehrzweckreifens mit geringem Durchmesser von $D < 1200$ mm. Als eine kurzfristiger realisierbare Alternative, besonders für die Arbeitsgänge der Saatbettbereitung, sollten gleichgroße Zwillingsräder verwendet werden.

Literatur

- [1] Petelkau, H.: Grundlagen für die Steuerung der Bodenbearbeitung unter Produktionsbedingungen zur Aufwandsminderung bei der Grundbodenbearbeitung und Qualitätsverbesserung bei der Saatbettbereitung. Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg 1985.
- [2] Rüdiger, A.; Köhler, U.: Erarbeitung von Grundlagen zur Bewertung und Konzipierung bodenschonender Fahrwerke und Weiterentwicklung der Meß- und Prüfmethoden. Institut für Energie- und Transportforschung Meißen-Rostock 1987.
- [3] Rüdiger, A.: Beitrag zur quantitativen Bewertung der Bodenbelastung durch Radfahrzeuge. Technische Universität Dresden, Dissertation B, 1989.
- [4] Rüdiger, A.; Döll, H.: Verdichtungswirkung ausgewählter Fahrwerksvarianten für die Triebachse des Traktors ZT 300. Institut für Energie- und Transportforschung Meißen-Rostock 1986. A 5816

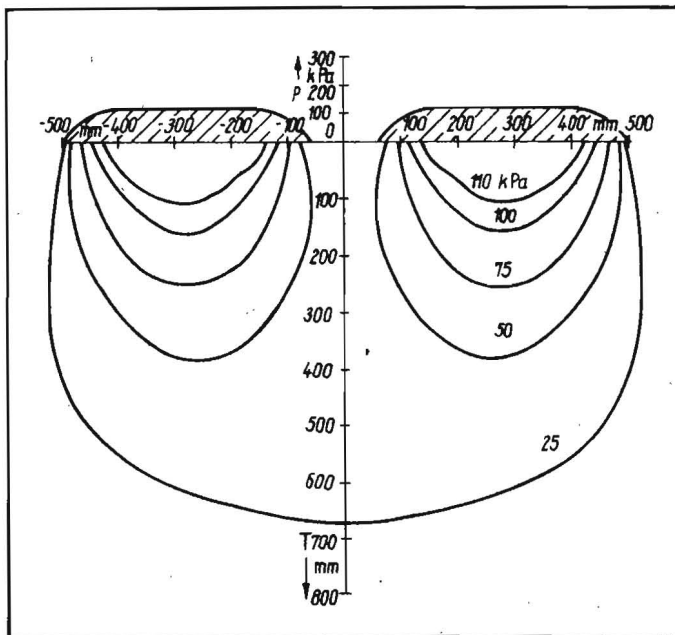


Bild 7. Berechnete Verteilung der Vertikalspannung im Querprofil unter dem Zwillingsrad 18,4 R 34 an der Hinterachse des Traktors ZT 300 (Radlast 25 kN, Reifeninnendruck 80 kPa)

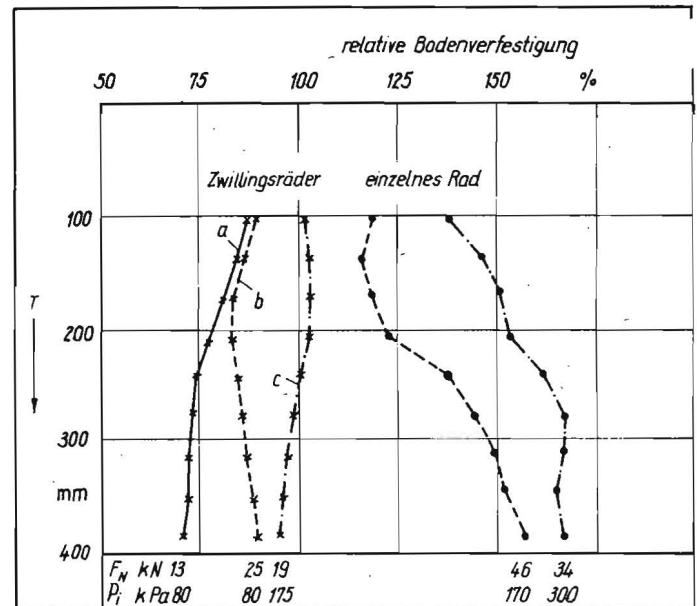


Bild 8. Verminderung der Bodenverfestigung durch den Einsatz von gleichgroßen Zwillingsrädern an den Traktoren ZT320 und K-700 A sowie am LKW W50, 100 % relative Bodenverfestigung $\hat{=}$ Traktor ZT320 mit Einzelrädern an der Hinterachse ($F_N = 25$ kN, $p_i = 150$ kPa); a Traktor ZT 320 (Hinterachse, Reifen 18,4-34), b Traktor K-700 A (Vorderachse, Reifen 725-665 P), c LKW W50 (Hinterachse, Reifen 16-20)