

Zur Bedeutung einiger physikalischer Bodenzustandsgrößen für Energieaufwand und Qualität der Bodenbearbeitung

Dr.-Ing. H. Sommerburg, KDT, Institut für Landmaschinentechnik Leipzig des VEB Weimar-Kombinat

Zur weiteren Erhöhung der Effektivität der landwirtschaftlichen Produktion muß auch die Bodenbearbeitung beitragen. Dieser Notwendigkeit wird aber die herkömmliche Bodenbearbeitungstechnik (Pflug mit allen zur Saat- und Herbstfurche erforderlichen Nachfolgegeräten) zunehmend weniger gerecht. Die Gründe liegen u. a. in mehreren werkzeugtechnischen Schwachstellen der Geräte [1]. Auch die in den nächsten Jahren in der Landwirtschaft der DDR neu zum Einsatz kommenden Bodenbearbeitungsgeräte werden noch mit solchen Schwachstellen behaftet sein. Um möglichst bald bessere, d. h. von Effektivitätsmindernden Schwachstellen freie Werkzeuge einsetzen zu können, bedarf es entsprechender Methoden ihrer Entwicklung. Es werden darum nachfolgend einige Gedanken zur Entwicklungsmethode, und zwar unter dem Gesichtspunkt der Bodenzustandsgrößen, dargelegt.

1. Kriterien der Bewertung von Werkzeugen

Aufgrund der Forderung nach größerer Bodenfruchtbarkeit (hohe und stabile Erträge) ist der als Ergebnis der Bearbeitung vorliegende Bodenzustand ein entscheidendes Kriterium der Effektivität der Bodenbearbeitung. Weitere Kriterien sind die Leistung in ha/h und die Verfahrenskosten in M/ha. Beide Kriterien sind u. a. vom Energieaufwand der Bearbeitung abhängig. Die Erhöhung der Effektivität der Bodenbearbeitung ist demnach ein Optimierungsproblem. Neue Werkzeuge müssen durch ein besseres Bearbeitungsergebnis und einen geringeren Energieaufwand zur Lösung dieses Problems beitragen. Es geht also um werkzeugtechnische Teillösungen des Problems der effektiveren Bodenbearbeitung.

Um neue Werkzeuge mit minimalem Aufwand auf theoretischem Weg entwickeln zu können, bedarf es noch umfangreicher Forschungen, sowohl hinsichtlich der mechanischen Vorgänge im Boden als auch hinsichtlich der Beziehungen zwischen mechanischen und pflanzenbaulich bedeutsamen physikalischen Bodenzustandsgrößen. Deswegen wird die experimentell-theoretische Methode mit systematischer Untersuchung von Werkzeugelementen als die gegenwärtig einzig aussichtsreiche bezeichnet [1] [2] [3].

Auch bei einer experimentell-theoretischen Entwicklung von Werkzeugen ist u. a. den obengenannten Effektivitätskriterien Rechnung zu tragen. Darum muß die Untersuchung von Werkzeugelementen auch zu quantitativen Aussagen über die Abhängigkeit sowohl des Energieaufwands als auch des Bearbeitungsergebnisses von entscheidenden Werkzeug-, Betriebs- und Bodenparametern führen. Es bleibt die Frage, wie solche Aussagen gewonnen werden können und welchen Bodenzustandsgrößen dabei Bedeutung zukommt.

2. Systematische Untersuchungen bei natürlichen Bodenverhältnissen

Um für die praktisch vorkommenden unterschiedlichen Bodenverhältnisse brauchbare Aussagen zu erhalten, müssen im Verlauf systematischer Untersuchungen der Werkzeugelemente solche unterschiedlichen Bodenverhältnisse auch in ausreichendem Umfang berücksichtigt werden. Das ist unter Laborbedingungen nicht möglich. Folglich bleibt nur der Weg der Untersuchung bei natürlichen Bodenverhältnissen im Feldeinsatz, zumal gegenwärtig auch die Übertragung von Versuchsergebnissen, die im Labor erzielt wurden, auf Praxisbedingungen problematisch ist [2] [3]. Wegen des bei natürlichen Bodenverhältnissen sogar auf ein und demselben Versuchsfeld ständig wechselnden Bodenzustands sind die Versuchsergebnisse statistisch zu analysieren, um trotz nicht erfaßter — zufälliger oder nicht bekannter — wesentlicher

Einflüsse des Bodens gesetzmäßige Beziehungen zwischen Energieaufwand bzw. Bearbeitungsergebnis und Werkzeug-, Betriebs- und Bodenparametern aufdecken zu können. Diesbezügliche quantitative Aussagen lassen sich als Mehrfachregressionsgleichungen gewinnen, in denen u. a. physikalische Bodenzustandsgrößen als Einflußgrößen enthalten sind. Darum wirkt ein ständig wechselnder Bodenzustand auf solche Aussagen um so weniger störend, je genauer und vollständiger er durch Messungen erfaßt wird; denn Einflüsse lassen sich statistisch um so gesicherter nachweisen, je breiter und feinstufiger die entsprechenden Größen variieren. Regressionsgleichungen zeigen zwar nicht unbedingt kausale Zusammenhänge auf, ihre Anwendung erlaubt aber, den Vorgang des sich in Abhängigkeit von Einflußgrößen verändernden Energieaufwands und Bearbeitungsergebnisses in einem bestimmten Bereich technisch im Sinne höherer Effektivität durch Bereitstellen entsprechender Werkzeuge zu beherrschen.

Bei natürlichen Bodenverhältnissen wirkende zufällige Bodeneinflüsse lassen sich durch den Vertrauensbereich des Regreßwertes berücksichtigen. Er ist ein Ausdruck der Zuverlässigkeit der gewonnenen Aussage. Der Vertrauensbereich ist auch um so kleiner, je vollständiger die wesentlichen Einflußgrößen in die Untersuchungen einbezogen sind. Darum kommt es u. a. darauf an, die Einflüsse des Bodens auf Energieaufwand und Bearbeitungsergebnis möglichst restlos zu erfassen. Nachfolgend wird erläutert, welche physikalischen Bodenzustandsgrößen unter diesem Gesichtspunkt für systematische Werkzeuguntersuchungen Bedeutung haben können.

3. Physikalische Bodenzustandsgrößen als Einflußgrößen des Energieaufwands

In den meisten Fällen werden Korngrößenverteilung, Dichte und Wassergehalt zur Charakterisierung der Bodenverhältnisse bei Versuchen benutzt [3]. Zu klären ist aber, ob diese Zustandsgrößen auch für eine möglichst restlose Erfassung der Bodeneinflüsse auf den Energieaufwand ausreichen bzw. geeignet sind.

Aus umfangreichen Pflugkörper-Untersuchungen liegen Meßergebnisse zum abschlämmbaren Anteil G_A (Korngrößen $\leq 0,02$ mm), zur Lagerungsdichte ρ_L (in g/cm^3) und zum Wassergehalt G_W vor [4]. Diese drei Zustandsgrößen stehen somit als Einflußgrößen für eine Regressionsgleichung des spezifischen Zugwiderstands zur Verfügung:

$$\hat{z} = f(x_1, x_2, \dots) \quad (1)$$

x_1, x_2, \dots Werkzeug-, Betriebs- und Bodenparameter.

Wegen der Bedingung, daß die in eine Regressionsgleichung einbezogenen Einflußgrößen nicht untereinander korrelieren, müssen die Beziehungen zwischen G_A , ρ_L und G_W bekannt sein.

Bild 1 zeigt anhand von Ergebnissen [4] die Stärke des Zusammenhangs jeweils zweier Bodenzustandsgrößen. Die Schraffur deutet die Tendenz für die Fälle statistisch gesicherter Zusammenhänge an (Fälle mit $r \geq r_{f,\alpha}$; r Korrelationskoeffizient, $r_{f,\alpha}$ Zufallshöchstwert des Korrelationskoeffizienten, α Irrtumswahrscheinlichkeit). Danach ist bei Zunahme der Kolloidhaltigkeit des Bodens im Mittel eine Zunahme des Wassergehalts und eine Abnahme der Lagerungsdichte zu verzeichnen. Zwischen Lagerungsdichte und Wassergehalt existiert kein wesentlicher Zusammenhang. Das erfordert, in eine Regressionsgleichung des spezifischen Zugwiderstands als Einflußgrößen des Bodens entweder nur Wassergehalt und Lagerungsdichte oder nur den abschlämmbaren Anteil einzubeziehen. Andererseits sind aber Aussagen bekannt, nach denen die Konsistenzigenschaften der Böden sowohl vom Tongehalt (entspricht G_A) als auch vom Wassergehalt und vom Bodengefüge (Porengefüge; entspricht in

etwa der Größe ρ_L) abhängig sind [5]. Folgende Überlegungen zeigen, daß beide Tatsachen sich nicht widersprechen. Jeder der dem Bild 1 zugrunde liegenden Zahlenwerte stammt von einer anderen Versuchsfläche, d. h., auf jeder Versuchsfläche wurde nur ein einziger Bodenzustand erfaßt, nämlich der zum Zeitpunkt der einmaligen Bearbeitung des Bodens vorgefundene. Die Zahlenwerte drücken darum nur den Umstand aus, daß kolloidhaltige Böden trotz niederschlagsbedingter Schwankungen im Mittel mehr Wasser speichern können und trotz unterschiedlich starker Einflüsse der Feldarbeitstechnik, Vorfrucht u. a. im Mittel eine geringere Lagerungsdichte besitzen als sandige Böden. Bei systematischen Untersuchungen unter natürlichen Bodenverhältnissen lassen sich demnach der Wassergehalt und die Lagerungsdichte dann als zusätzliche Einflußgrößen neben dem abschlämmbaren Anteil G_A benutzen, wenn sie sich als vom textur- (G_A -) bedingten Porenvolumenanteil unabhängige, nur vom Niederschlag, von der Feldarbeitstechnik, der Vorfrucht u. a. abhängige Größen darstellen lassen. Auf eine geeignete Darstellung weist beispielsweise eine Aussage hin, nach der das Pflügen bei einem Wassergehalt von etwa 40% der Wasserkapazität des Bodens die geringste Zugkraft erfordert [6]. Somit erscheint es angebracht, den auf die minimale Wasserkapazität K_W des Bodens bezogenen Wassergehalt als Einflußgröße zu benutzen und ihn als Sättigungsgrad S zu bezeichnen:

$$S = \frac{G_W}{K_W} \quad (2)$$

Die minimale Wasserkapazität K_W ist eine bei ackerbaulichen Versuchen gebräuchliche Bodenzustandsgröße. Sie charakterisiert unter natürlichen Bodenverhältnissen jene Wassermenge, die sich bei tiefliegendem Grundwasserspiegel (> 3 bis 4 m) nach reichlicher Durchfeuchtung und dem Abfluß des gesamten Gravitationswassers in praktisch unbeweglichem Zustand im Boden befindet [5]. Im Sättigungsgrad S kommt zum Ausdruck, daß beim gleichen Wassergehalt von beispielsweise $G_W = 0,15$ ein Sandboden als verhältnismäßig naß, ein Tonboden aber als verhältnismäßig trocken zu bezeichnen ist. Analog hierzu läßt sich die Lagerungsdichte ρ_L auf die maximal mögliche Lagerungsdichte $\rho_{L,max}$ beziehen und als Verdichtungsgrad V bezeichnen:

$$V = \frac{\rho_L}{\rho_{L,max}} \quad (3)$$

Die maximal mögliche Lagerungsdichte $\rho_{L,max}$ ist eine bisher nicht gebräuchliche Bodenzustandsgröße. Sie charakterisiert die bei gleichmäßiger Vermischung der unterschiedlichen Korngrößen erreichbare dichteste Packung einer Bodenprobe. Das dabei vorliegende Bodenvolumen setzt sich zusammen aus dem der Bodenkörner und dem aufgrund der Einzelkorngestalt zwischen den Körnern verbleibenden Porenvolumen. Die zur Bestimmung von $\rho_{L,max}$ geeignete Untersuchungsmethode (Laborverfahren) müßte erst erprobt werden.

Es ist anzunehmen, daß sich mit Hilfe der drei physikalischen Bodenzustandsgrößen abschlämbarer Anteil G_A , Sättigungsgrad S und Verdichtungsgrad V der Einfluß des Bodens auf den Energieaufwand der Bearbeitung nahezu vollständig berücksichtigen läßt. Inwieweit diese Annahme richtig ist, kann erst anhand von Versuchsergebnissen, speziell anhand des Vertrauensbereiches mathematischer Modelle, eingeschätzt werden.

4. Physikalische Bodenzustandsgrößen zur Beschreibung des Bearbeitungsergebnisses

Aufgrund der Forderung nach größerer Bodenfruchtbarkeit erscheint es zweckmäßig, das Bearbeitungsergebnis mit Hilfe keimungs- und wachstumsentscheidender physikalischer Bodenzustandsgrößen zu beschreiben. Vorliegenden agrotechnischen Forderungen [7][8] und anderen Aussagen ist zu entnehmen, daß die Keimungs- und Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen vor allem von der Porengrößen-, Aggregatgrößen- und Dichteverteilung im Boden abhängen. Diese Bodenverhältnisse sind entscheidend für den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt des Bodens.

Bezüglich der Porengrößenverteilung interessieren nur die durch

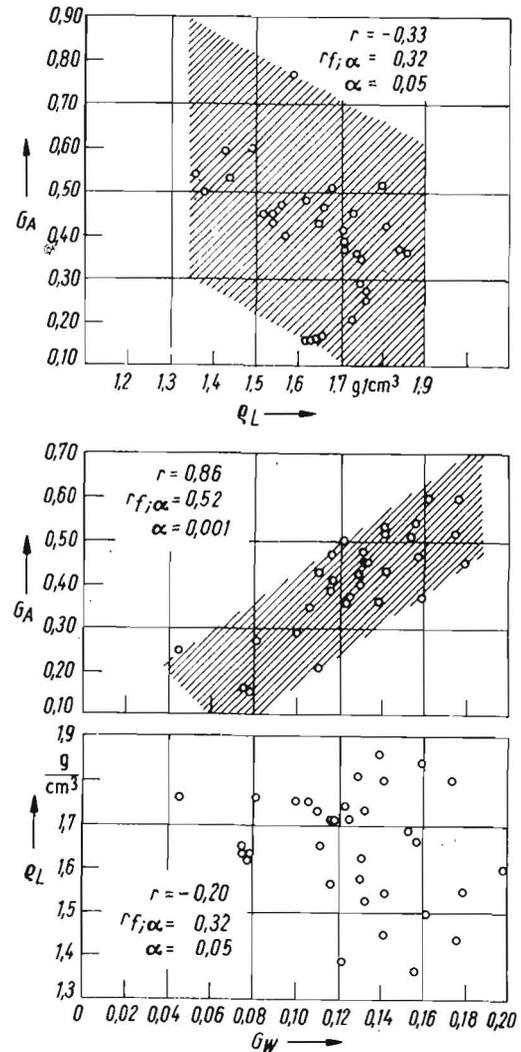


Bild 1. Zusammenhänge von Bodenparametern

Bodenbearbeitung beeinflussbaren, pflanzenbaulich bedeutsamen Porengrößenklassen, in denen sich das Sickerwasser bewegt.

Dabei ist zu unterscheiden in schnelldrainende Poren mit einem Durchmesser > 0,06 mm (Luftkapazität) und in langsamdrainende Poren mit einem Durchmesser von 0,06 bis 0,01 mm (nichtkapillare Wasserkapazität). Da der Anteil dieser beiden Porengrößenklassen am Gesamtporenvolumen interessiert, bedarf es zusätzlich der Ermittlung der Klasse der mittleren und feinen Poren mit einem Durchmesser < 0,01 mm (kapillare Wasserkapazität). Für diese drei Porengrößenklassen sind Untersuchungsmethoden bekannt [5].

Ebenso sind zur Ermittlung der Aggregatgrößenverteilung pflanzenbaulich bedeutsame Aggregatgrößenklassen zu bilden. Agrotechnische Forderungen beziehen sich beispielsweise auf drei Klassen:

< 10 mm; 10 bis 40 mm; 40 bis 60 mm [8]. Unter Umständen können aus der Sicht der Werkzeugentwicklung und -beurteilung mehr und engere Klassen notwendig sein. Ausschlaggebend für die Klasseneinteilung ist ein geeignetes Meßverfahren. Die Möglichkeiten zum Bestimmen der Anteile von Volumina gleicher Dichte (nach Dichteklassen) am Gesamtbodenvolumen sind begrenzt durch das kleinste meßtechnisch erfassbare Bodenteilvolumen. Andererseits braucht man noch eindeutigere Aussagen über die aus pflanzenbaulicher Sicht notwendige Differenziertheit von Dichteangaben bei Werkzeuguntersuchungen (minimale Größe der zu messenden Bodenteilvolumina) als Voraussetzung

für das Ermitteln des Dichtehomogenitätsgrades eines gegebenen Bodengesamtvolumens.

Um in jedem Fall die für die anzubauende Kulturpflanze optimalen Keimungs- und Wachstumsbedingungen schaffen zu können, muß sich ein vorgegebener Bodenanzustand mit geeigneten Werkzeugen wahlweise in unterschiedliche Bodenendzustände überführen lassen. Das bedeutet, daß man den Bearbeitungseffekt von Werkzeugen (= Differenz zwischen Bodenanzustand- und -endzustand) durch Variation einzelner Werkzeugparameter so breit und feinstufig variieren können muß, daß die optimalen Bodenzustände mit Sicherheit einbezogen sind. Die Entwicklung solcher Werkzeuge ist möglich trotz der Tatsache, daß gegenwärtig keine exakten Zahlenwerte für das Optimum der verschiedenen Bodenzustandsgrößen bekannt sind. Außerdem kommen solche Werkzeuge auch der Forderung nach regelbarem Bearbeitungseffekt in künftigen Bodenbearbeitungsaggregaten entgegen.

Der Einsatz von Werkzeugen mit regelbarem Bearbeitungseffekt setzt voraus, daß quantitative Aussagen über die Abhängigkeit der keimungs- und wachstumsentscheidenden physikalischen Bodenzustandsgrößen von Werkzeug-, Betriebs- und Bodenparametern existieren. Dazu müssen — ebenso wie für Aussagen über den Energieaufwand — systematische Untersuchungen unter natürlichen Bodenverhältnissen durchgeführt werden, um mathematische Modelle in Form von Mehrfachregressionsgleichungen

$$Z_2 = F(Z_1, x_1, x_2, \dots) \quad (4)$$

für alle Zustandsgrößen Z zu erzielen. Dazu zählen die verschiedenen, ackerbaulich bedeutsamen Porengrößen-, Aggregatgrößen- und Dichteklassen.

Z_2 kennzeichnet jeweils den End- und Z_1 den Anfangszustand. Welche Zustandsgrößen als weitere Bodenparameter zum Zweck möglichst restloser Erfassung der Bodeneinflüsse auf das Bearbeitungsergebnis in Betracht kommen (G_A , S , V o. a.) läßt sich anhand von Untersuchungsergebnissen klären.

Quantitative Aussagen gemäß Gl. (4) gestatten auch, unter sonst gleichen Versuchsbedingungen (Betriebs- und Bodenparameter einschließlich Z_1) unterschiedliche Werkzeuge bzw. systematisch abgestufte Varianten einzelner Werkzeugelemente hinsichtlich ihres Bearbeitungseffekts ΔZ zu vergleichen:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad (5)$$

5. Zusammenfassung

Eine weitere Erhöhung der Effektivität der Bodenbearbeitung erfordert auch besser geeignete Werkzeuge. Wichtige Kriterien der Eignung sind der Energieaufwand und das Bearbeitungsergebnis. Darum muß ein Anliegen experimentell-theoretischer Werkzeugentwicklung sein, quantitative Aussagen über die Abhängigkeit dieser beiden Kriterien von Werkzeug-, Betriebs- und Bodenparametern zu erhalten. Im Interesse praktisch nützlicher Aussagen sollten systematische Untersuchungen von Werkzeugelementen unter natürlichen Bodenverhältnissen erfolgen. Zur möglichst restlosen Erfassung der Bodeneinflüsse auf den Energieaufwand werden der abschlämmbare Anteil, der Sättigungsgrad und der Verdichtungsgrad als zweckmäßige physikalische Zustandsgrößen angesehen. Für die Beschreibung des Bearbeitungsergebnisses bietet sich ein Komplex von pflanzenbaulich bedeutsamen Zustandsgrößen, u. a. verschiedene Porengrößenklassen, an.

Literatur

- [1] Soucek, R.: Zu einigen Fragen des technischen Standes der Bodenbearbeitungsgeräte in der DDR und deren Weiterentwicklung. agrartechnik 24 (1974) H. 1, S. 23—25.
- [2] Lucius, J.: Methodik der Werkzeugentwicklung für die Bodenbearbeitung. Dt. Agrartechnik 22 (1972) H. 11, S. 515—517.
- [3] Soucek, R. u. a.: Die Bedeutung des Bodens als Werkstoff für das Entwickeln von Bodenbearbeitungswerkzeugen. agrartechnik 24 (1974) H. 9, S. 444—446.
- [4] Sommerburg, H.: Versuch der Nutzung vorhandener Meßergebnisse für Untersuchungen über den Einfluß der Arbeitsgeschwindigkeit und einiger Parameter der Pflugkörperform und des Bodens auf den spezifischen Zugwiderstand eines dreifurchigen Anhängelbeetpfluges. TU Dresden, Dissertation 1975.
- [5] Kullmann, A. u. a.: Untersuchungsmethoden des Bodenstrukturzustandes. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag 1968.
- [6] Roemer, T.: Scheffer, F.: Lehrbuch des Ackerbaus. Berlin: Verlag Paul Parey 1949.
- [7] Autorenkollektiv: Normative für die Bodenbearbeitung. agra-Broschüre 1973.
- [8] Kunze, A.: Bodenbearbeitung und Bestellung in hoher Qualität — eine wichtige Voraussetzung für die weitere Steigerung und Stabilisierung der Erträge. agrartechnik 24 (1974) H. 1, S. 20—22. A 1079

Ein mathematisches Modell der Einflüsse auf den Zugwiderstand beim Pflügen

Dr.-Ing. H. Sommerburg, KDT, Institut für Landmaschinentechnik Leipzig des VEB Weimar-Kombinat

1. Problemstellung

Als Beitrag zur höheren Effektivität der Produktion der sozialistischen Landwirtschaft ist auch die Pflugarbeit effektiver zu gestalten. In den kommenden Jahren wird die Landwirtschaft der DDR leistungstärkere Traktoren aus sowjetischer Produktion erhalten, die gemäß den Entwicklungstendenzen im Traktorenbau der UdSSR noch höhere Arbeitsgeschwindigkeiten als bisher bei der Pflugarbeit zulassen [1]. Darum ist es wichtig zu wissen, bei welchen konstruktiven Merkmalen der spezifische Zugwiderstand auch bei einer höheren Arbeitsgeschwindigkeit einen zulässigen Betrag nicht überschreitet und in welchem Maß dieser Zusammenhang von den Bodenverhältnissen beeinflusst wird.

Deshalb kommt einer quantitativen Aussage über die Einflüsse der Arbeitsgeschwindigkeit, der Pflugkörperform und des Bodens auf den spezifischen Zugwiderstand besondere Bedeutung zu. Ein mathematisches Modell dieser Einflüsse würde gestatten, für einen vorgegebenen Boden und eine vorgegebene Geschwindigkeitsstufe die entsprechende Pflugkörperform auszuwählen, bzw. sie zu konstruieren, ohne sie mit großem Aufwand empirisch

entwickeln zu müssen. Außerdem könnten dann fertigungstechnisch oder pflugtechnisch begründete Grenzen der durch Formveränderungen am Pflugkörper möglichen Zugwiderstandsenkung eingeschätzt und notfalls Aufgaben zur Entwicklung prinzipiell neuer Werkzeugarten abgeleitet werden.

2. Stand bisheriger Untersuchungen

In [2] wird zum Ausdruck gebracht, daß der gegenwärtige Stand der landtechnischen Forschung zwar noch keine quantitative Aussage in Form eines mathematischen Modells der Einflüsse liefert, daß aber neben der Arbeitsgeschwindigkeit vor allem Parameter der Pflugkörperform und des Bodenzustands als entscheidende Einflußgrößen in Betracht kommen. Davon ausgehend werden in [2] Meßergebnisse aus Feldversuchen statistisch ausgewertet, was zu folgender Regressionsgleichung führt:

$$\hat{z} = 139,019 + 2,481 \Omega - 4,256 \Delta_1 + 903,899 G_A + 10,27 v^2 \quad (1)$$

bei $s_R = 116,70 \text{ N/dm}^2$ und $v = 21,8\%$.

\hat{z} Regression des spezifischen Zugwiderstands in N/dm^2