Ermittlung der räumlichen Heterogenität des Bodengefüges mit einem Penetrometer auf einem Sandstandort

Determination of the Spatial Heterogeneity of the Soil Structure with a Penetrometer at a Sand Location

Horst Domsch und Rolf Adamek
Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam

Kurzfassung: Auf einer Fläche mit einem festen Befahrmuster sowie einer tiefgelockerten Fläche sind Messungen zur Bestimmung des Durchdringungswiderstandes mit einem Penetrometer entlang von 80 m langen Trassen senkrecht zur Hauptbearbeitungsrichtung bei einem Meßpunktabstand von 0,15 m vorgenommen worden. Die zu Schichtmittelwerten zusammengefaßten Meßwerte wurden mit geostatistischen Methoden ausgewertet. Sowohl aus der Autokorrelationsfunktion wie auch aus der Semivarianzfunktion ergeben sich Meßpunktabstände von weniger als einem halben Meter, um räumlich abhängige Meßwertverläufe darstellen zu können. Die Unabhängigkeit der Werte ist bei einem Meßpunktabstand (dem Range) von etwa 0,8 m gegeben. Durch die Berechnung der spektralen Leistungsdichte wurden prägnante Wellenlängen bestimmt, die die räumliche Anordnung des Befahrmusters exakt widerspiegeln. Mittels der Kreuzkorrelation konnte ein enger Zusammenhang zwischen den Meßwertverläufen benachbarter Schichtmittelwerte ermittelt werden.
Deskriptoren: Durchdringungswiderstand, Penetrometer, Zeitreihenanalyse, Geostatistik, Sandboden, Semivarianz, Trasse

Abstract: *On an area with a fixed vehicle transport pattern and a deeply loosened area, measurements were carried out using a Penetrometer to determine the penetration resistance along 80 m long transects perpendicular to the main direction of tillage, with a measuring point spacing of 0.15 m. The measurements, combined to form mean values for different soil layers, were analysed using geostatistical methods. Both the autocorrelation function and the semivariance function show that measuring point spacing of less than half a metre is necessary to display spatially dependent measurement curves. Independence of the values is assured at a range of about 0.8 m. By calculating the power spectral density, pregnant wavelengths were determined which reflect the spatial arrangement of vehicular travel exactly. By means of cross correlation, it was possible to determine a close connection between the measurement curves of neighbouring mean values of different soil layers.*
Keywords: *Penetration resistance, Penetrometer, Time series analysis, Geostatistic, Sandy soil, Semivariance, Transect*

1 Problem- und Zielstellung

Die Gefügebildung ist ein Vorgang, der durch chemische, physikalische und biologische Faktoren beeinflußt wird [1]. Auf ackerbaulich genutzten Flächen sind es vorrangig die Bodenbelastungen durch die Fahrwerke der Maschinen, Geräte und Transportmittel sowie die Bodenbearbeitung, die zu einer ständigen Veränderung des Makrogefüges beitragen. Diese bewirtschaftungsbedingten Änderungen des Bodengefüges werden wegen der längerwährenden Beibehaltung einer Bearbeitungsrichtung sowie durch die Nutzung der selben Geräte und Maschinen mit bestimmter Arbeitsbreite am deutlichsten bei Untersuchungen senkrecht zur Bearbeitungsrichtung sichtbar.

Zur quantitativen Kennzeichnung des Bodengefüges dienen Meßgrößen, die jeweils bestimmte Eigenschaften des Gefüges widerspiegeln. Eine umfangreichere Kennzeichnung des Gefüges bedarf der Bestimmung durch mehrere Meßgrößen. Wesentliche Änderungen des Ge-

fügezustandes lassen sich dagegen bereits durch eine Meßgröße lokalisieren.

Als Standardgröße der Gefügebeschreibung gilt die Trockenrohdichte (TRD), d.h. die spezifische Masse eines ungestörten Bodenelementes im trockenen Zustand. Unter Nutzung dieser Meßgröße wurden in mehreren Ländern Optimalbereiche oder zulässige Bereiche des Bodenzustandes definiert [2]. Für die Ermittlung der TRD gibt es mehrere Meßverfahren, allerdings keines mit einer hohen Produktivität. Für die Bestimmung des Gefüges an vielen Meßpunkten, verteilt auf die Fläche und die Tiefe des durch Fahrwerksbelastungen beeinflußten Bodens, ist die TRD deshalb nur bedingt geeignet.

Effektiver als die TRD läßt sich der Durchdringungswiderstand (DW) des Bodens mittels eines Penetrometers bestimmen. Der DW ist der Widerstand des Bodens, den dieser der Bewegung eines festen Körpers eines bestimmten Querschnitts entgegensetzt. Er wird in der Dimension Kraft/Fläche angegeben. Vertikalpenetrometer bestimmen während eines Einstiches den DW in Abhängigkeit der Tiefe. Horizontalpenetrometer definieren während eines Meßvorganges den DW in einer Tiefe entlang einer Strecke. Die Messung des DW ist im Vergleich zur Bestimmung der TRD wesentlich effektiver.

Der Meßwert des DW kann bei der Ermittlung mit einem Vertikalpenetrometer verfälscht werden, wenn der Kraftsensor am oberen Ende des Schaftes angeordnet wird. Dieser Aufbau war für die früheren Geräteausführungen typisch und führte dazu, daß die Reibung des Bodens am Schaft Bestandteil des Meßwertes wurde. Der Anteil der Schaftreibung am Meßwert kann bis zu 40 % im lockeren Sand und im weichen, klebenden Ton betragen [3]. Bei neueren Lösungen ist der Kraftsensor unmittelbar hinter der Kegelspitze angeordnet.

Die Höhe des DW ist vorrangig vom Bodensubstrat, dem Wassergehalt und dem Zustand des Bodengefüges abhängig. Da auch die TRD das Bodengefüge kennzeichnet, kann angenommen werden, daß für das gleiche Bodensubstrat bei einem festen Wassergehalt TRD und DW proportional sind. Diese Hypothese ist durch frühere Untersuchungsergebnisse belegt [4, 5] und ist unter Laborbedingungen sehr eng [6]. Der Zusammenhang wird schwächer mit steigendem Wassergehalt [5]. Neuere Messungen unter Feldbedingungen lassen dagegen nur relativ schwache Zusammenhänge zwischen beiden Größen erkennen [7, 8, 9]. Die Höhe der Verdichtung sowie die räumliche Verteilung der Verdichtungszonen beeinflussen den Zusammenhang zusätzlich [9]. Nach Horn u.a. bewirkt eine steigende Bodenbelastung ein stetiges Ansteigen des DW begleitet durch ein Ansteigen der TRD, die jedoch bei sehr hohen Belastungen konstant bleibt oder sogar rückläufig sein kann [10]. Diese Erscheinung könnte zu dem geringeren Zusammenhang beider Größen in neueren Untersuchungen beigetragen haben.

Am stärksten beeinflußt wird der DW vom Wassergehalt des Bodens. Ermittelt wurden sowohl lineare Abhängigkeiten [5, 11, 12] als auch exponentielle [13]. Busscher u.a. ermitteln Bestimmtheitsmaße zwischen 0,72 und 0,92 unter Verwendung verschiedener nichtlinearer Regressionsfunktionen bei Beschränkung auf je einen Untersuchungsstandort. Das Bestimmtheitsmaß sinkt auf kleiner 0,4 bei dem Versuch, alle Bedingungen mit einer einzigen Funktion beschreiben zu wollen [14]. Nach Earl existiert ein linearer Zusammenhang zwischen dem DW und der Saugspannung des Wassers, ausgedrückt als pF-Wert [15].

Die Kovarianzanalyse ermöglicht, den Einfluß der verschiedenen Einflußfaktoren zu trennen. Christensen u.a. [16] beziehen in die Untersuchungen die TRD und den Wassergehalt, Yasin u.a. [17] zusätzlich die Meßtiefe ein. Der Geltungsbereich dieser Beziehungen bleibt auf die jeweiligen Untersuchungsbedingungen beschränkt.

Um Aussagen über die räumliche Verteilung der Werte des DW zu erhalten, sind Methoden der Geostatistik für die Planung und Auswertung der Versuche erforderlich. Hartge u.a. bestimmen verschiedene bodenphysikalische Größen auf einer Fläche von 0,5 ha in einem Raster von 10 x 10 m [18]. Fulton u. a. erfassen den DW auf einer 7 ha großen Fläche in einem Raster von 30,5 x 30,5 m [8]. Ley u.a. messen den DW im Abstand von 2 m auf 30 m langen Trassen. Die errechneten Semivariogramme weisen hohe Nuggetanteile auf. Dies kann ein Zeichen dafür sein, daß die Abhängigkeit der benachbarten Werte bei diesem Meßpunktabstand schon relativ gering ist [19]. Meshalkina u.a. untersuchen die räumliche Variabilität des DW in der obersten Bodenschicht [20].

Ziel der eigenen Untersuchungen war es, die Veränderung des Gefügezustandes, ausgedrückt durch die Größe DW, entlang von Trassen senkrecht zur Hauptbearbeitungsrichtung zu ermitteln und zur Auswertung geostatistische Methoden zu nutzen, um die räumliche Abhängigkeit der Gefügeänderungen analysieren zu können [21].

2 Methode

Der Versuchsstandort liegt im Moränenbereich der jüngeren Eiszeit. Die Fläche gehört zum Gebiet einer Talsandablagerung. Der Boden ist ein schwach schluffiger Sand (Su2). Die Änderungen der Textur im Untersuchungsbereich lassen geringe Schwankungen, jedoch keinen Trend erkennen. Der Feinsandanteil beträgt etwa 50 %.

Die Fläche wurde bis zum Jahr 1989 unter Nutzung des Pfluges bewirtschaftet und anschließend bis 1995 stillgelegt. Seitdem wird sie pfluglos bearbeitet, d.h. jährlich mit einer Grubberkombination auf ca. 15 cm Tiefe gelockert. Im Jahr 1993 sind auf einem ca. 80 m breiten Abschnitt dieser Fläche im Abstand von 3,2 m Fahrspurpaare angelegt und unterschiedlich hoch belastet worden. Ein Teilbereich dieses Fahrspurgebietes wurde im Sommer 1995 mit einem Parapflug wieder gelockert (**Bild 1**).

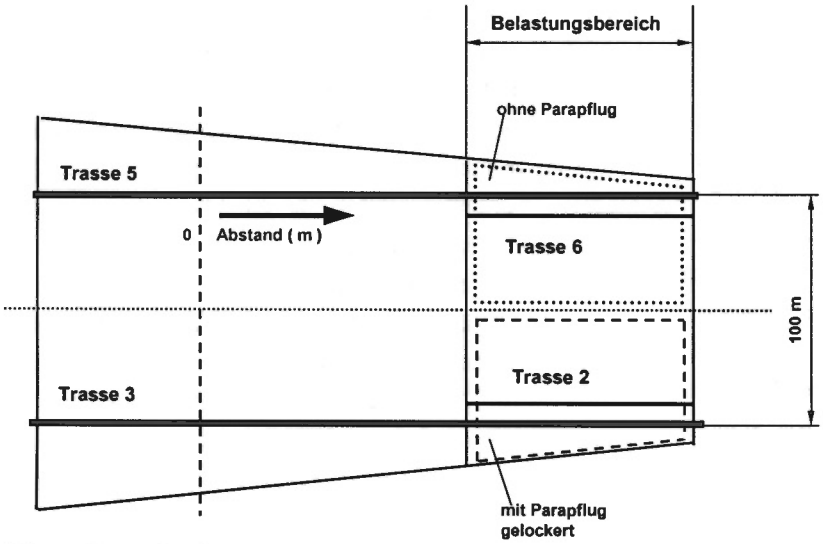

Bild 1: Versuchsschema
Fig. 1: Test plot arrangement

Die Untersuchungen erfolgten entlang von Trassen senkrecht zum Verlauf der Fahrspuren. Die Trassen 5 und 6 durchschneiden senkrecht den Bereich der ungelockerten, die Trassen 3 und 2 den Bereich der gelockerten Fahrspuren. Für die spätere geostatistische Auswertung war ein konstanter Meßpunktabstand gefordert. Er wurde auf 15 cm festgesetzt, um zu gewährleisten, daß die einzelnen Fahrspuren sich im Werteverlauf eindeutig widerspiegeln. Die Meßtiefe betrug 70 cm und der Abstand zwischen den benachbarten Trassen 5 m. Die Beprobung der jeweils zweiten Trasse (Trasse 6 und 2) erfolgte ein Jahr nach den ersten Messungen, so daß sie sowohl ein räumlicher wie auch ein zeitlicher Abstand trennt. Die Trassenlänge von 80 m erfaßte den gesamten ehemaligen Fahrspurbereich.

Da Beziehungen zur Kompensation unterschiedlicher Bodenwassergehalte nicht zur Verfügung standen, mußte der zulässige Bereich des Wassergehaltes während der Messungen eingeschränkt werden. Die Saugspannung wurde täglich innerhalb des Abschnittes, der sondiert worden war, bestimmt. Sie streute während der Messungen zwischen 90 und 160 mbar.

Für die Messungen wurde ein Penetrometer der Firma Medium-Sensor verwendet. Ein Piezogeber ist unmittelbar hinter der Kegelspitze mit einer Querschnittsfläche von 1 cm² und einem Spitzenwinkel von 30° angeordnet. Der Meßbereich reicht bis zu einem Widerstand von 10,2 N/mm² sowie einer durch einen Ultraschallsensor gemessenen Tiefe von 70 cm. Die Meßwerte werden mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,04 N/mm² erfaßt und mit einer Abtastrate von 1 cm Tiefe abgespeichert. Sie lassen sich über eine serielle Schnittstelle unter Nutzung einer mitgelieferten Software in einen PC übertragen und in ein gewünschtes Format konvertieren.

Um die hohen Durchdringungswiderstände überwinden und eine möglichst konstante Vorschubgeschwindigkeit einhalten zu können, wurde das Penetrometer hydraulisch in den Boden gedrückt. Dazu diente ein Meßrahmen mit einer Vertikalführung, der an einen Traktor angebaut war. Der hydraulische Antrieb gewährleistete die volle Ausnutzung des Meßbereiches des Penetrometers sowie gleichzeitig den Schutz vor Überlastung.

Bedingt durch zu hohe Bodenverdichtung oder Steine kann es zum Abbruch einer Messung kommen, wenn der Meßbereich der Sonde überschritten wird. Für diesen Fall stehen unterhalb dieses Meßpunktes keine Werte zur Verfügung. Wären eindeutig Steine die Ursache für die Fehlwerte, könnten diese durch Interpolationsverfahren aus den Nachbarwerten kalkuliert werden [22]. Das häufige Zusammentreffen der Fehlwerte mit Stellen kleinräumiger hoher Verdichtung bedeutet aber, daß an diesen Stellen auch ein Meßwert vorhanden sein kann, der größer als der Maximalwert des Penetrometers ist.

Diese Werte sind wegen der abrupten Änderung in der Übergangszone zwischen einer hochbelasteten Spur und dem „unbefahrenen" Boden über ein Interpolationsverfahren nicht hinreichend kalkulierbar. Deshalb wurden alle Fehlwerte durch den Wert 10,5 N/mm² ersetzt. Der Einfluß dieser Festlegung wird am Verlauf des gleitenden Mittelwertes über 10 Meßwerte sichtbar (**Bild 2**).

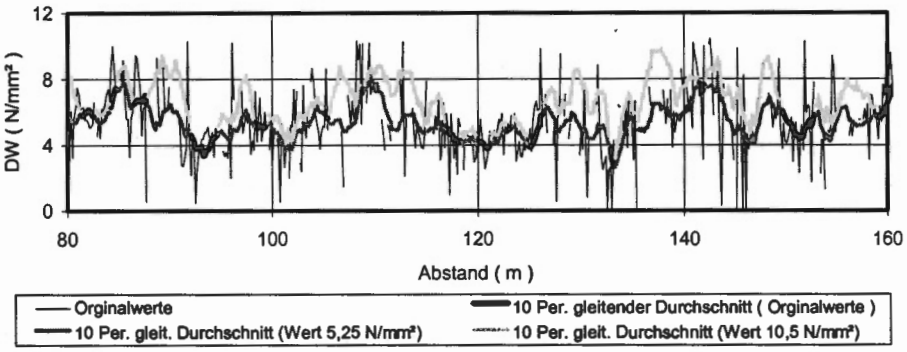

Bild 2: Änderung des Verlaufes des gleitenden Mittelwertes beim Ersatz von Fehlwerten durch zwei verschiedene Festwerte (Trasse 6, 40 cm-Schicht)
Fig. 2: Modification of the curve of the flexible mean value when missing values are replaced by two different fixed values (transect 6, 40 cm-layer)

Wird die Berechnung des gleitenden Mittelwertes unterbrochen, sobald die notwendige Wertemenge für dessen Berechnung aufgrund der Fehlstellen nicht ausreicht, ergibt sich der wahre, aber lückenhafte Mittelwertverlauf. Je nachdem, mit welchen Werten die Fehlstellen aufgefüllt werden, verändert sich der Verlauf des gleitenden Mittelwertes im Bereich der Lücken. Die Veränderung der Mittelwertkurve durch das Einsetzen des Wertes 10,5 N/mm² in alle Fehlstellen im Vergleich zu dessen halb so großen Wert zeigt den Einfluß einer solchen Maßnahme. Der wahre aber unbekannte komplette Verlauf des gleitenden Mittelwertes dürfte zwischen den eingezeichneten Kurven pendeln.

Für die Auswertung wurden die Einzelwerte alle 10 cm zu Schichtmittelwerten zusammengefaßt. Als Schichtmittelwert wird die Schichttiefe ±3 cm, also ein Mittelwert aus 7 Einzelwerten definiert. Schichten >40 cm wurden wegen der steigenden Menge an Fehlwerten nicht weiter betrachtet.

3 Ergebnisse

3.1 Verlauf der Meßwerte

In den Meßwertverläufen der vier untersuchten Trassen sowie der vier untersuchten Tiefen treten selbst auf engstem Raum ausgeprägte Unterschiede zwischen den Meßwerten in Erscheinung (Bild 3). Die Mittelwertkurven verdeutlichen , daß diese hochfrequenten Fluktuationen den Fluktuationen größerer Wellenlängen überlagert sind. Insgesamt sind die Werte, bedingt durch das Substrat, deutlich höher als üblich.

Die Meßwertverläufe der Trassen 5 und 6, d. h. der nicht tiefgelockerten Variante, zeigen insbesondere in der 30 cm-Schicht eine hohe Ähnlichkeit in den langwelligen Fluktuationen. Dies bedeutet, daß trotz des räumlichen Abstandes der Trassen von 5 m sowie des zeitlichen Versatzes des Meßzeitpunktes von einem Jahr das Gefüge in dieser Tiefe ein vergleichbares Änderungsmuster aufweist und durch den DW ähnlich beschrieben wird. In den 20 cm- und 40 cm-Schichten ist die Ähnlichkeit in der ersten Hälfte der Trasse stärker als in der zweiten ausgeprägt. In der 10 cm-Schicht, die zwischen den Messungen bearbeitet wurde, ist zwischen den Trassen erwartungsgemäß keine erhebliche Übereinstimmung mehr zu beobachten.

Die Fahrspuren hatten zu einer deutlichen Differenzierung des Gefügezustandes geführt, der durch den Meßwertverlauf der Trassen 5 und 6 in ähnlicher Form abgebildet wird. Die tiefe Lockerung mit dem Parapflug hat dieses markante Gefügemuster im wesentlichen beseitigt und es in ein neues, indifferentes Muster überführt. Nur in der 40 cm-Schicht, wo die Lockerung nicht ganzflächig wirkte, läßt sich noch eine klare Gefügedifferenzierung lokalisieren (**Bild 3**). Hervorstechend ist das gemeinsame Maximum der Trassen 2 und 3 bei einem Abstand von ca. 135 m. In diesem Bereich wurde beim Lockern eine Parzellenbreite ausgelassen.

3.2 Autokorrelation und Semivarianz

Um die Abhängigkeit von Meßwerten zu prüfen, die eine bestimmte Anzahl von Meßpunktabständen (Lags) voneinander entfernt ermittelt wurden, kann man die Autokorrelation oder Semivarianz berechnen. In beiden Fällen ist ein im Meßwertverlauf vorhandener Trend zuvor zu eliminieren.

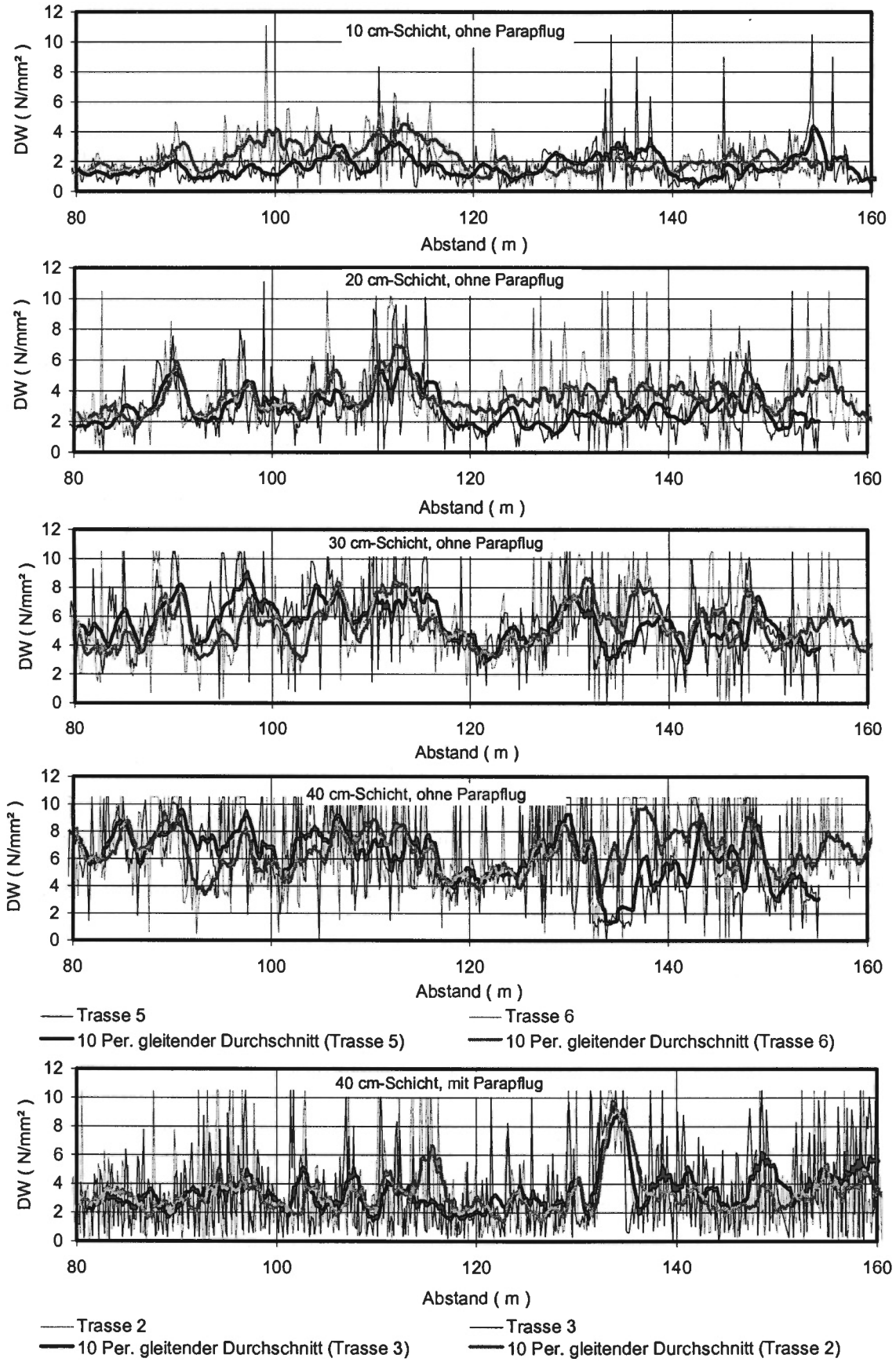

Bild 3: Meßwertverlauf des Durchdringungswiderstandes der Trassen 5 und 6 (ohne Parapflug) in den Schichttiefen 10 bis 40 cm sowie der Trassen 2 und 3 (mit Parapflug) in der Tiefe 40 cm

Fig. 3: Measurement curve of the penetration resistance of transects 5 and 6 (without a paraplow) in the soil layer depths 10 to 40 cm and of transects 2 and 3 (with a paraplow) at a depth of 40 cm.

Definiert ist die Autokorrelationsfunktion durch

$$r(h) = \frac{1}{N \times s^2} \sum_{i=1}^{N-h} (x_{i+h} - \bar{x})(x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

und die standardisierte Semivarianzfunktion durch

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h) \times s^2} \sum_{i=1}^{N(h)} (x_i - x_{i+h})^2 \quad (2)$$

wobei N die Zahl der Meßwerte, s^2 die Varianz aller Meßwerte x_i, x_i den Meßwert am Meßort i, $\bar{x}$ den Mittelwert der Meßwerte x_i und h die Anzahl der Lags bezeichnet [nach 22].

Die Autokorrelationsfunktion (AKF), im Autokorrelogramm dargestellt in Abhängigkeit des Meßpunktabstandes, beginnt beim Wert 1 für Lag = 0 (Vergleich der Meßreihe mit sich selbst) und nähert sich mit größer werdendem Abstand der Meßstellen voneinander dem Wert 0 (**Bild 4**).

Regelmäßig wiederkehrende Änderungen im Meßwertverlauf äußern sich im Autokorrelogramm durch ausgeprägte Fluktuationen, deren Wellenlängen die harmonischen Schwingungen kennzeichnen, aus denen sich der Meßwertverlauf zusammensetzt. An dem Wert des Lags, an dem die AKF die Nullinie zum ersten Mal schneidet, ist mit Sicherheit zwischen den zugehörigen Meßwerten keinerlei Abhängigkeit mehr vorhanden. Um die räumliche Abhängigkeit der Werte darzustellen, müssen benachbarte Werte dagegen noch eine hinreichende Abhängigkeit voneinander aufweisen. Empfohlen wird der Meßpunktabstand, bei dem die AKF den Wert 1/e = 0,37 aufweist [23].

Die Semivarianzfunktion kann als Spiegelbild der Autokorrelationsfunktion betrachtet werden (**Bild 5**). Sie beginnt bei einem Lag von 0 bei dem Nuggetwert, der im Idealfall dem Wert 0 entspricht und steigt anschließend bis zu einem im wesentlichen konstant bleibenden Wert, den Sill, an. Der Abstand, bei dem der Sill erreicht wird, heißt Range. Der Range ist der Meßpunktabstand, ab dem zwischen den Meßwerten keine Abhängigkeit mehr besteht [21]. Analog zur Autokorrelationsfunktion läßt sich auch aus der Semivarianzfunktion ein Meßpunktabstand errechnen, der optimal für die räumliche Darstellung von Meßgrößen ist [24]. Diese Berechnung wurde jedoch nicht vorgenommen.

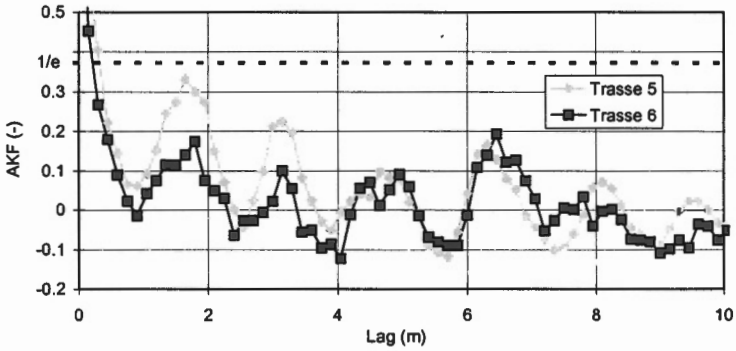

Bild 4: Autokorrelogramm (Autocorrelogram) für die Trassen 5 und 6 (ohne Parapflug) in der 20 cm-Schicht, dargestellt für den Auswertebereich von 0 - 10 m

Fig. 4: Autocorrelogram for transects 5 and 6 (without a paraplow) in the 20 cm layer, shown for the analysis range 0 - 10 m

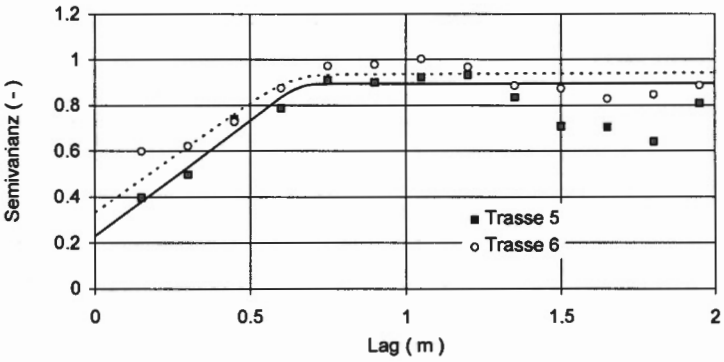

Bild 5: Standardisiertes Semivariogramm (Semivariogram) für die Trassen 5 und 6 (ohne Parapflug) in der 20 cm-Schicht, dargestellt für den Auswertebereich 0 - 2 m

Fig. 5: Standardised semivariogram for transects 5 and 6 (without a paraplow) in the 20 cm layer, shown for the analysis range 0 - 2 m

Der nicht tiefgelockerte Boden (Trassen 5 und 6) ist durch einen Wechsel von festerem und weniger festem Gefüge aufgrund der Fahrspuren gekennzeichnet. Die Fahrspuren sind etwa 50 cm breit. Die Meßpunktabstände, die erforderlich sind, um diese räumlichen Veränderungen widerzuspiegeln, streuen zwischen einem und drei Lag (0,15 bis - 0,45 m) (Meßpunktabstand 1 in **Bild 6**). Auf dem tiefgelockerten Boden (Trassen 2 und 3) fehlt ein solches Gefügemuster. Die Schwankungen sind mehr zufällig. Das führt dazu, daß selbst der gewählte Meßpunktabstand von 0,15 m häufig schon zu groß ist, um noch eine Abhängigkeit zwischen benachbarten Werten belegen zu können.

Der Range weist bezüglich der beiden Gefügezustände die gleiche Tendenz auf. Da er den Meßpunktabstand für voneinander unabhängige Meßwerte angibt, sind die absoluten Werte höher als der Meßpunktabstand 1, in

etwa dreimal so hoch (Bild 5). Der optimale Meßpunktabstand zur Erfassung räumlicher Abhängigkeiten ist kleiner als die Hälfte dieses Wertes [24]. Damit stimmen beide Bestimmungsmethoden ungefähr überein, obwohl im Einzelfall größere Abweichungen auftreten (Trasse 3). Der Nulldurchgang der Autokorrelationsfunktion ergibt Meßpunktabstände, die ein Mehrfaches des Range betragen. Es ist offensichtlich, daß eine Unabhängigkeit der Werte untereinander nicht auf den Wert 0 des Korrelationskoeffizienten eingeengt werden darf (Meßpunktabstand 2 in Bild 6).

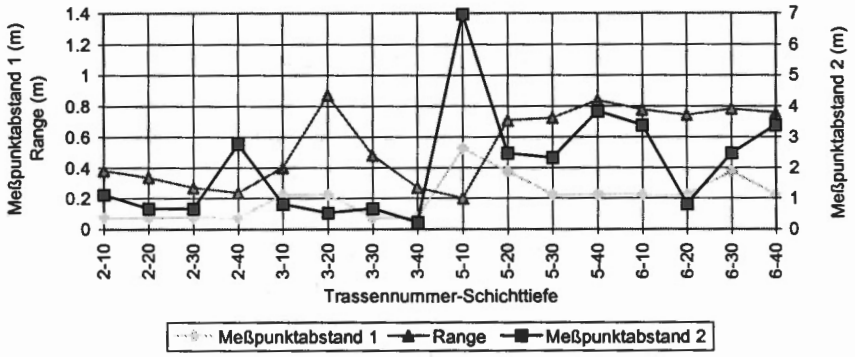

Bild 6: Meßpunktabstände (Meßpunktabstand 1: Räumliche Abhängigkeit aus der Autokorrelationsfunktion; Range: Räumliche Unabhängigkeit aus der Semivarianzfunktion; Meßpunktabstand 2: Räumliche Unabhängigkeit aus der AKF)

Fig. 6: Measuring point spacings (measuring point spacing 1: spatial dependence arising from the autocorrelation function; range: spatial independence arising from the semivariance function; measuring point spacing 2: spatial independence arising from the AKF)

3.3 Spektrale Leistungsdichte

Durch die Berechnung der spektralen Leistungsdichte lassen sich die Wellenlängen der harmonischen Schwingungen, aus denen das Meßsignal zusammengesetzt ist, ermitteln. Sie zeigen sich im Periodogramm (Varianz als Funktion der Wellenlänge) als örtliche Peaks [25]. In diesem Verfahren können nur Wellenlängen analysiert werden, die sich aus der Meßstreckenlänge dividiert durch eine ganze Zahl ergeben. Je länger die Meßstrecke und je kleiner die interessierende Wellenlänge ist, desto exakter ist die Analyse. Begrenzt wird die kleinste zu analysierende Wellenlänge durch den Wert des doppelten Meßpunktabstandes.

Die Spektralanalyse quantifiziert die aus dem Meßwertverlauf und dem Autokorrelogramm ersichtliche Bewertung der Meßsignale. Besonders der nicht tiefgelokkerte Bereich ist durch dominante Schwingungen geprägt, die in beiden Trassen dieses Bereiches nachweisbar sind (**Bild 7**).

In allen vier Tiefen ist die Wellenlänge 1,6 m vertreten. Der Wert entspricht der halben Breite der Fahrspurparzelle bzw. dem Wechsel von Fahrspur und unbefahrenem Streifen. Trotz mehrfacher Grubberbearbeitung ist dieses Muster selbst in der 10 cm-Schicht noch erkennbar. In der 20 cm-Schicht ist es am stärksten ausgeprägt. Darüber hinaus gibt es weitere Wellenlängen, die in beiden Trassen in bestimmten Tiefen dominieren, die aber anhand der Bewirtschaftung seit 1993 nicht interpretiert werden können (z.B. Wellenlängen von ca. 8 m und ca.19 m).

Im tiefgelockerten Bodenbereich (ohne Bild) fehlen Schwingungen, die eindeutig hervortreten und den Meßwertverlauf bestimmen. Somit ist auch kaum eine Übereinstimmung zwischen den beiden vergleichbaren Trassen vorhanden. Die Wellenlänge 1,6 m ist aber selbst in diesem Feldbereich über alle Tiefen, wenn auch nur wenig ausgeprägt, vorhanden. Hinzu kommt eine deutliche Schwingung mit ca. 0,5 m Wellenlänge, die auf die Arbeitsbreite eines Werkzeuges des Parapfluges zurückgeführt werden kann.

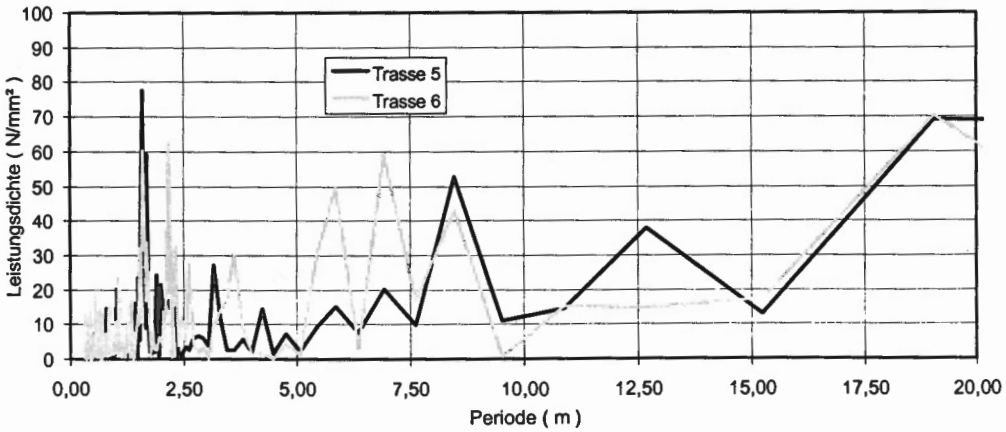

Bild 7: Periodogramm der Trassen 5 und 6 für die 20 cm-Schicht

Fig. 7: Periodogram of transects 5 and 6 for the 20 cm-layer

3.4 Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation ermöglicht den Vergleich zweier Meßreihen in Abhängigkeit der räumlichen Verschiebung der Meßstellen zueinander. Das Verfahren entspricht dem der Autokorrelation mit dem Unterschied, daß zwei unterschiedliche Meßreihen verglichen werden. Zwischen den Meßwertverläufen benachbarter Bodenschichten der gleichen Trasse besteht ein deutlicher Zusammenhang, gekennzeichnet durch Korrelationskoeffizienten zwischen 0,45 und 0,68 (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Korrelationskoffizienten für den Vergleich benachbarter Bodenschichten bei einem Lag von 0
Table 1: Correlation coefficients for the comparison of neighbouring soil layers at a lag of 0

Trassen-Nr.	Vergleich der Bodenschichten		
	10/20 (cm)	20/30 (cm)	30/40 (cm)
2	0,477	0,513	0,544
3	0,539	0,509	0,688
5	0,634	0,683	0,663
6	0,459	0,668	0,654

Im Kreuzkorrelogramm der Trasse 5 sind wiederum Fluktuationen sichtbar, die auf regelmäßige Gefügeänderungen hinweisen (**Bild 8**) und deshalb in den Trassen 2 und 3 nicht zu beobachten sind. Der engste Zusammenhang zwischen den Schichten besteht jeweils bei dem Lag 0, d.h. zwischen den direkt über- bzw. untereinander liegenden Meßpunkten. Im Mittel ist der Zusammenhang zwischen den Schichten in der Trasse 5 und über alle Trassen zwischen der 30 cm- und der 40 cm-Schicht am engsten (Tabelle 1).

Ein Vergleich der Trassen 5 und 6 zeigt den höchsten Zusammenhang in der 20 cm-Schicht (**Bild 9**). Dieser nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Am geringsten ist er in der 10 cm-Schicht aufgrund der zwischenzeitlich erfolgten Bearbeitung. Der höchste Zusammenhang tritt erst bei einer Verschiebung der Meßreihen um 1 - 2 Lag auf. Es ist zu vermuten, daß diese Abweichungen auf Fehler bei der Bestimmung des Weges zurückzuführen sind.

Ein erheblicher Zusammenhang zwischen den Trassen 2 und 3 (nicht dargestellt) ist bei einem maximalen Korrelationskoeffizienten von 0,2, der auch nur in der 40 cm-Schicht auftritt, nicht vorhanden. Das Fehlen eines deutlich ausgeprägten Gefügemusters verhindert eine größere Ähnlichkeit zwischen den benachbarten Trassen.

4 Diskussion und Schlußfolgerungen

Bewirtschaftungsbedingte Gefügeänderungen lassen sich durch Messungen entlang von Trassen senkrecht zur Hauptbearbeitungsrichtung exakt erfassen. Bei dem gegenwärtigen Erkenntnisstand zur Bestimmung von Gefügeänderungen ist die Größe Durchdringungswiderstand (DW), gemessen mit einem Vertikalpenetrometer, zu bevorzugen.

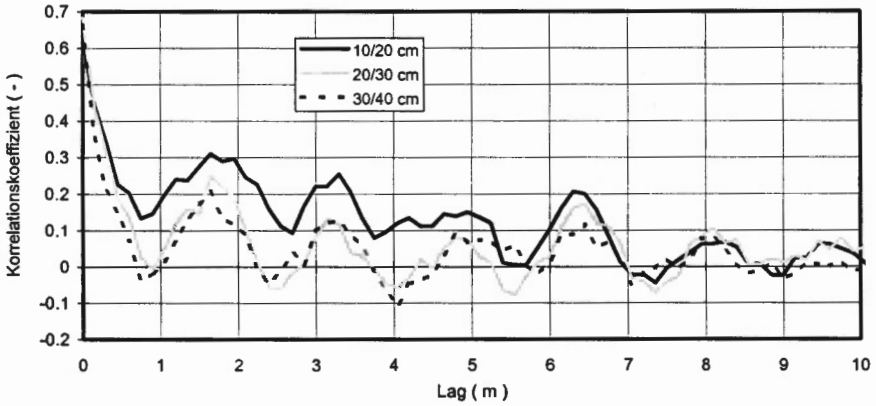

Bild 8: Kreuzkorrelogramm für den Vergleich der benachbarten Schichten der Trasse 5 (ohne Parapflug)
Fig. 8: Cross-correlogram for the comparison between neighbouring layers of transect 5 (without a paraplow)

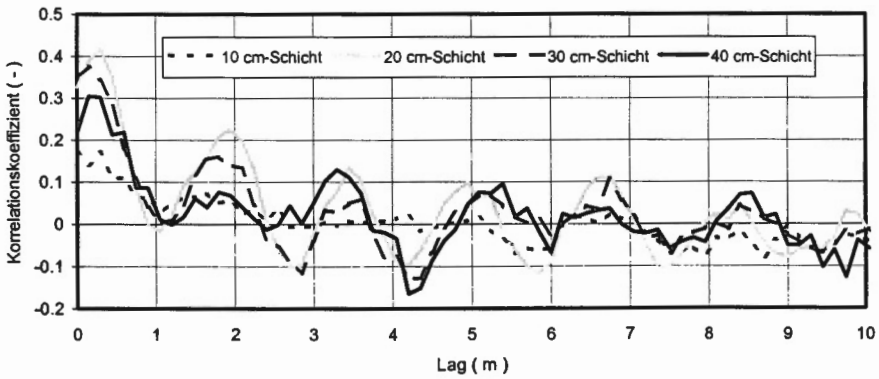

Bild 9: Kreuzkorrelogramm für den Vergleich der Trassen 5 und 6 (ohne Parapflug)
Fig. 9: Cross-correlogram for the comparison of transects 5 and 6 (without a paraplow)

Der DW wird in Abhängigkeit von der Tiefe präzis ermittelt, und die Messungen können bei einem Bodenwassergehalt im Bereich der Feldkapazität auf bestellten Flächen zerstörungsfrei vorgenommen werden.

Bereits der Verlauf der DW-Meßwerte entlang einer Trasse erlaubt erste Aussagen über das vorhandene Gefügemuster. Durch die Ermittlung der spektralen Leistungsdichte lassen sich die Wellenlängen der den Verlauf prägenden Schwingungen bestimmen. Ein Gefügemuster, das durch den beschriebenen Fahrspurversuch entstanden war, läßt sich auf diese Weise reproduzierbar abbilden. Fehlt ein solches Gefügemuster, wird auch der indifferente Gefügezustand bei wiederholten Messungen bestätigt.

Für den Landwirt sind Gefügeuntersuchungen besonders dann interessant, wenn er Entscheidungshilfen für ganzflächig oder teilflächenspezifisch durchzuführende Lokkerungsmaßnahmen aus den Ergebnissen ableiten kann. Ein Vergleich der Meßwerte mit standortspezifischen Richtwerten ermöglicht die Vorentscheidung. Je deutlicher der Meßwertverlauf durch langwellige Fluktuationen geprägt ist bzw. sich Bereiche eines festeren Gefüges und Bereiche eines weniger festen Gefüges ablösen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, eine ganzflächige Lockerung vermeiden zu können. Teilflächenspezifische Lockerung bietet sich an, wenn die Breite der weniger festen Bereiche mindestens der Gerätebreite des Lockerungsgerätes entspricht, also periodisch eine Durchfahrt ausgelassen werden kann. Unterstellt man eine Gerätebreite von 2,5 m, so werden Fluktuationen mit einer Wellenlänge von mehr als 5 m interessant.

Größere Wellenlängen lassen sich desto genauer bestimmen, je länger die untersuchte Trasse ist. Deshalb sind Trassen mit mehr als 100 m Länge vorzusehen. Um den Untersuchungsaufwand trotzdem zu begrenzen, ist der größte zulässige Meßpunktabstand zu wählen. Wie der Vergleich der beiden Untersuchungsbedingungen gezeigt hat, steigt dieser, wenn ein deutliches Gefügemuster auf der Fläche vorhanden ist. Da die räumliche Abhängigkeit benachbarter Werte für den Landwirt nur interessant ist, wenn ein solches Muster vorliegt, kann er einen größeren Meßpunktabstand wählen. Für die Weiterführung der Untersuchungen von Praxisflächen wird deshalb ein Meßpunktabstand von 0,5 m vorgeschlagen. Dieser Wert übersteigt den, der sich aus der Autokorrelationsfunktion ergibt, ist aber noch deutlich geringer als der errechnete Range. Auf der Grundlage weiterer Untersuchungen ist dieser Wert zu präzisieren.

Literatur

[1] Mückenhausen E.: Bodenkunde. 4., ergänzte Auflage. Frankfurt am Main, DLG-Verlag, 1993

[2] Dürr, H.J., H. Petelkau und C. Sommer: Literaturstudie „Bodenverdichtung". Reihe Texte des Umweltbundesamtes Nr. 55/95, Berlin 1995

[3] Barone, L. und S. Faugno: Penetration test for measurement of soil strength: Assesment of the contribution of shaft friction. J. agric. Engng. Res. 64 (1996) 103-108

[4] Bauder, J.W., G.W. Randall und J.B. Swan: Effect of four continuous tillage systems on mechanical impedance of a clay loam soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 45 (1981) 802-806. (Zit. in [8]).

[5] Ayers, P.D. und J.V. Perumpral: Moisture and density effect on cone index. Transaction of the ASAE (1982). (Zit. in [8])

[6] Panayiotopoulos, K.P., C.P. Papadopoulou und A. Hatjiioannidou: Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. Soil & Tillage Research 31(1994) 323-337

[7] Unger, P.W.: Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. Soil & Tillage Research 37 (1996) 67-75

[8] Fulton, J.P., L.G. Wells, S.A. Shearer and R.I. Barnhisel: Spatial variation of soil physical properties: A precursor to Precision tillage. http://www.bae.uky.edu/shearer/PrecisionTillage.htm

[9] Domsch, H: Durchdringungswiderstand und Trockenrohdichte - Vergleich dieser Meßgrößen bei Messungen entlang von Trassen. Landtechnik 53 (1998) 2, S. 2-3

[10] Horn, R., H. Domzal, A. Slowinska-Jurkiewicz und C. van Ouwerkerk: Soli compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil & Tillage Research 35 (1995) 23-36

[11] Shafiq, M., A. Hassan und S. Ahmad: Soil physical properties as influenced by induced compaction under laboratory and field conditions. Soil & Tillage Research 29 (1994) 13-22

[12] Ley, G.J., Mullins, C.E. und R. Lal: The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils. Soil & Tillage Research 33 (1995) 133-142

[13] Ohu, J.O., G.S.V. Raghavan und E. McKyes: Cone index prediction of compacted soils. Transaction of the ASAE 31(1988) 2, 306-310

[14] Busscher, W.J., P.J. Bauer, C.R. Camp und R.E. Sojka: Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. Soil & Tillage Research 43 (1997) 205-217

[15] Earl, R.: Prediction of trafficability and workability using Tensiometers. J. agric. Engng. Res. 63 (1996) 27-34

[16] Christensen, N.B., J.B. Sisson und P.L. Barnes: A method for analyzing penetration resistance data. Soil & Tillage Research 13 (1989) 83-91

[17] Yasin, M., R.D. Grisso, L.L. Bashford, A.J. Jones und L.N. Mielke: Normalizing cone resistance values by covariance analysis. Transaction of the ASAE 36 (1993) 5, 1267-1270

[18] Hartge, K.H., B. Siemer und J. Bachmann: Vergleich einiger Methoden für die Bestimmung der räumlichen Variabilität physikalischer Bodeneigenschaften: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung 34 (1993) 5, 297-302

[19] Ley, G.J. und K.B. Laryea: Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical Alfisol. Soil & Tillage Research 29 (1994) 367-381

[20] Meshalkina, J.L., A. Stein und Y.A. Dmitriev: Spatial variability of penetration data on Russian plots in different land use. Soil-Technology 8 (1995) 1, 43-59

[21] Davis, J.C.: Statistics and data analysis in Geology. (Sec.Ed.). John Wiley&Sons, 1986

[22] Wendroth, O.,u.a.: Statistical approaches to the analysis of soil quality data. In: Gregorich, E.G. and M.R. Carter: Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier 1997, S. 247-276

[23] Nielsen, D.R., O.Wendroth und M.B. Parlange: Opportunities for Examining On-Farm Soil Variability. Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems. ©1995 ASA-CSSA-SSSA (USA): 95-132

[24] Han, S., J.W. Hummel, C.E. Goering und M.D. Cahn: Cell size selection for site-specific crop management. Transaction of the ASAE 37 (1994) 1, 19-26

[25] Domsch, H. und O. Wendroth: Vergleich der Meßgrößen Durchdringungswiderstand und Trockenrohdichte zur Beschreibung der bewirtschaftungsbedingten Gefügeheterogenität. 109. VDLUFA-Kongress, 15.-20. September 1997 in Leipzig. Veröffentlicht in der VDLUFA Schriftenreihe 46 (Kongreßband 1997 in Leipzig)