

Meßergebnisse aus Feldversuchen wird durch statistische Analyse ein mathematisches Modell der Einflüsse als Mehrfachregressionsgleichung mit ausreichend großer Zuverlässigkeit seiner Aussage gewonnen. Es enthält als Einflußgrößen die Arbeitsgeschwindigkeit, zwei Parameter der Pflugkörperform und einen Bodenparameter. Anhand der berechneten Regressions- und Elastizitätskoeffizienten und aus dem Charakter des Modells ergeben sich Schlußfolgerungen für die Anwendung des mathematischen Modells bei der Pflugkörper-Entwicklung und beim Pflugkörper-Einsatz.

Literatur

[1] Krupp, G.: Über Einsatzkennwerte der neuen sowjetischen

Traktoren K-701, T-150 und T-150 K. agrartechnik 24 (1974) H. 1, S. 6—9.

- [2] Sommerburg, H.: Über den Einfluß der Pflugkörperform auf den Zugwiderstand. agrartechnik 23 (1973) H. 1, S. 42—46.
- [3] 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 Anhängereetpfluges. TU Dresden, Dissertation 1975.
- [4] Förster, E.; Egermayer, F.: Korrelations- und Regressionsanalyse. Berlin: Verlag Die Wirtschaft 1966.
- [5] Frenkel, A.: Mathematische Analyse der Arbeitsproduktivität. Berlin: Verlag Die Wirtschaft 1970. A 1080

Röntgenografische Ergebnisse zur Bedeutung von Aggregatgrößen- und Dichteverteilung im Boden

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

Agrotechnische Forderungen (ATF) und in der Fachliteratur enthaltene Aussagen aus ackerbaulich-bodenphysikalischen Untersuchungen weisen darauf hin, daß die Keimungs- und Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen unter anderem von der Porengrößen-, Dichte- und Aggregatgrößenverteilung im Boden abhängen. Das dadurch gekennzeichnete Bodengefüge ist ausschlaggebend für den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt. Um aber die Verteilungen erfassen und beurteilen zu können, braucht man außer einer Einteilung in pflanzenbaulich begründete Porengrößen-, Dichte- und Aggregatgrößenklassen auch geeignete Meßverfahren.

1. Problemstellung

Agrotechnische Forderungen an die Aggregatgrößenverteilung beziehen sich beispielsweise auf folgende Aggregatgrößenklassen: < 10 mm, 10 bis 40 mm, 40 bis 60 mm [1][2]. Unter Umständen ist zur differenzierten Beurteilung beim Entwickeln neuer Bodenbearbeitungswerkzeuge eine feinere Klasseneinteilung nötig. Jedoch ist z. Z. kein Verfahren bekannt, das gestattet, Größe und Lage der Aggregate sowie eingearbeiteter organischer Rückstände in beliebigen Schichten (bis unter die Bearbeitungsgrenze) beschädigungsfrei und möglichst berührungslos sichtbar zu machen bzw. quantitativ zu erfassen.

2. Stand der Technik

Bekanntes Verfahren (Siebanalyse, Freigraben zum Abbilden oder zum subjektiven Beurteilen, Bohrstöcke, Strömungs- und Diffusionsmeßverfahren) erfüllen die o. g. Bedingung nicht. Berührungsloses Erfassen des Bodengefüges ist aber beispielsweise mit Hilfe von Röntgenstrahlen möglich, da sie der unterschiedlichen Dichte entsprechend geschwächt werden. Allerdings liefert das Röntgenverfahren in der Abbildung die Summe aller durchstrahlten Bodenbestandteile, und eine Zuordnung von Aggregaten zu einzelnen interessierenden Bodenschichten ist darum nicht möglich. Das ist nur bei Stereoröntgen erreichbar; jedoch sind keine technischen Lösungen für die quantitative Auswertung eines Raumbildes solcher Vielfalt bekannt, wie es das Gefüge von Ackerboden darstellt. Das menschliche Auge muß bei Stereobetrachtung schnell und extrem fern-nah akkommodieren, was sehr anstrengend ist; es kann sich nur auf kleinere Volumeneinheiten konzentrieren, das vorgegebene Bodenvolumen aber nicht in seiner Gesamtheit erfassen.

Literaturstudium und Konsultationen führten aber zu Informationen über das in der Medizin gebräuchliche Röntgenschnittbild. Hierbei handelt es sich um das Prinzip der bevorzugten

Darstellung einer bestimmten Körperschicht unter Ausschaltung aller außerhalb dieser Schicht liegenden Details. Daraus ergab sich die Aufgabe, die Anwendbarkeit dieses Prinzips für Ackerboden zu prüfen.

3. Ziel der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen war, auf einem Röntgenbild eine hinreichende Information über die in einer ideellen vertikalen Schnittebene im Inneren eines gegebenen Bodens vorhandenen Aggregatgrößen und organischen Rückstände (Stroh u. a.) zu erhalten. Dazu sollten Helligkeit, Kontrast und Konturenschärfe optimal kombiniert und hierfür alle röntgentechnischen Möglichkeiten (Filmtypen, Folientypen u. a.) maximal ausgenutzt werden. Die Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Röntgenabteilung der Zentralklinik Bad Berka.

4. Röntgeneinrichtung

Das Prinzip der Schichtdarstellung besteht darin, daß während der Belichtung des Films zwei Teile des aus Brennfleck, Objekt und Film bestehenden Aufnahmesystems (Bild 1) koordiniert derart bewegt werden, daß dabei das Verhältnis der Abstände vom Brennfleck ($R_1, R_2 \dots$) zur darzustellenden Objektschicht (S) einerseits sowie vom Brennfleck zum Film ($F_1, F_2 \dots$) andererseits konstant bleibt, so daß allgemein gilt

$$\frac{R_1 D}{R_1 D_1} = \frac{R_x D}{R_x D_x}$$

Alle Röntgenstrahlen, die durch Punkte einer Schicht S gehen, für die diese Bedingung erfüllt ist (z. B. P, D), treffen dann in jeder Phase des Bewegungsablaufs gleiche Punkte ($P_1, D_1, P_2, D_2; \dots$) des Films. Die betreffende Schicht wird deshalb scharf abgebildet. Für alle Punkte außerhalb von ihr (Q) ändert sich dagegen das Abstandsverhältnis während der Bewegung; sie werden deswegen laufend auf verschiedene Stellen des Films projiziert (Q_1, Q_2, \dots), dadurch verwischt und außerdem unterbelichtet [3].

Für die Untersuchungen stand eine Einrichtung vom Typ „Polytome H“ aus der BRD zur Verfügung. Röntgenröhre und Film dieser Einrichtung können folgende Kurven (in der Projektion auf die abzubildende Schicht) durchlaufen:

- Geraden mit einem Pendelwinkel $\alpha = 10^\circ \dots 50^\circ$
- Kreise mit $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$ (Zonografie) sowie mit $\alpha = 29^\circ \dots 36^\circ$
- Ellipsen mit in beiden Hauptrichtungen jeweils $\alpha = 40^\circ$ auf der großen Achse
- Hypozykloide mit $\alpha = 48^\circ$.

Dabei beträgt der Brennfleck-Film-Abstand 1400 mm bei einem Vergrößerungsfaktor von $R_x D_x / R_x D = 1,3$.

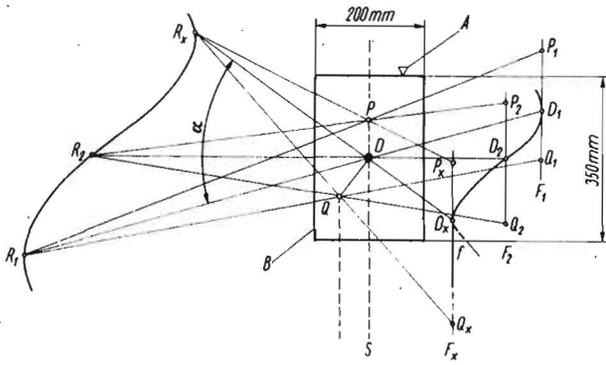


Bild 1. Prinzip der bevorzugten Darstellung von Körperschichten nach [3]; A Ackeroberfläche. B Objekt (Bodenprobe)

5. Bodenproben

Die Röntgenschnittbilder sollten von Ackerboden stammen, der versuchsweise mit unterschiedlichen Nachbearbeitungswerkzeugen nach dem Pflügen bearbeitet worden war. Da eine stationäre Röntgeneinrichtung benutzt werden mußte, war es notwendig, möglichst großvolumige Bodenproben zu ihr hin zu transportieren. Ihre Abmessungen waren durch den Vergrößerungsfaktor der Röntgeneinrichtung und die maximale Filmgröße (35 cm x 43 cm) nach oben begrenzt. Um eine noch auswertbare vertikale Schicht in einem ungestörten Probenkern zur Verfügung zu haben und das Bodengefüge über die volle Tiefe der letzten Pflugbearbeitung abbilden zu können, wurden Proben von 350 mm Tiefe, 300 mm Breite und 200 mm Dicke festgelegt. Die Entnahme der Proben

Bild 2. Bodenprobe mit relativ großen Dichteunterschieden:
a) Röntgenschnittbild



b) Originalschnittbild



erfolgte mit Hilfe eines Stechkastens, der vor dem Transport der Proben zur Röntgeneinrichtung durch eine Paraffinummantelung ersetzt wurde.

6. Ergebnisse des Schichtröntgens

Die Bilder 2a und 3a zeigen verkleinerte Beispiele der erhaltenen Schichtaufnahmen. Sie wurden hergestellt mit einem medizinischen Röntgenfilm HS 11, Format, 35 cm x 43 cm, mit Salzverstärkerfolie „Universal“, bei einer kreisförmigen Überlaufkurve von Röntgenröhre und Film mit dem Pendelwinkel $\alpha = 29^\circ$, bei 105 kV Röhrenspannung und 300 mAs Röhrenladung. Aufgrund einer bei dieser Überlaufkurve bevorzugt abgebildeten Körperschicht von nur 1 bis 2 mm Dicke kommen die Aufnahmen einem ideellen vertikalen Schnitt durch die Bodenproben nahe. Da es sich bei den Bildern 2a und 3 um Positivkopien handelt, zeugen helle Stellen von einer geringen, dunkle Stellen von einer großen Dichte des Bodens.

Um die in den Röntgenschnittbildern enthaltenen Informationen schnell und richtig deuten zu lernen, wurden die Schichtaufnahmen mit lediglich zu diesem Zweck hergestellten entsprechenden Schnitten durch die Originalbodenproben verglichen. Der im Bild 2b gezeigte Originalschnitt entspricht in etwa der Röntgenschnittaufnahme im Bild 2a. Wegen der geringen Bindigkeit des im Bild 3a gezeigten Bodens ließ sich für diese Probe kein vergleichbares Originalschnittbild herstellen.

Röntgenschnittbilder enthalten selbstverständlich die objektiveren Informationen; denn nicht in jedem Fall sind die im Originalschnitt als Aggregate erscheinenden Stellen auch Stellen relativ großer Dichte. Bei extremen Differenzen von Hell und Dunkel innerhalb eines Röntgenschnittbildes bewirkte erst ein elektronisches Kopierverfahren (ELKOP) durch Kontrastausgleich, daß sich Aggregatgrenzen abzeichneten. Die Bilder 2a und 3a sind aber Aufnahmen ohne Kontrastausgleich. Bild 2a zeigt in

etwa halber Tiefe der Probe große Aggregate großer Dichte (A) und darunter einen dadurch verursachten Hohlraum (H). Über dem großen Aggregat befindet sich eine relativ mächtige feinkrümelige Bodenschicht (F).

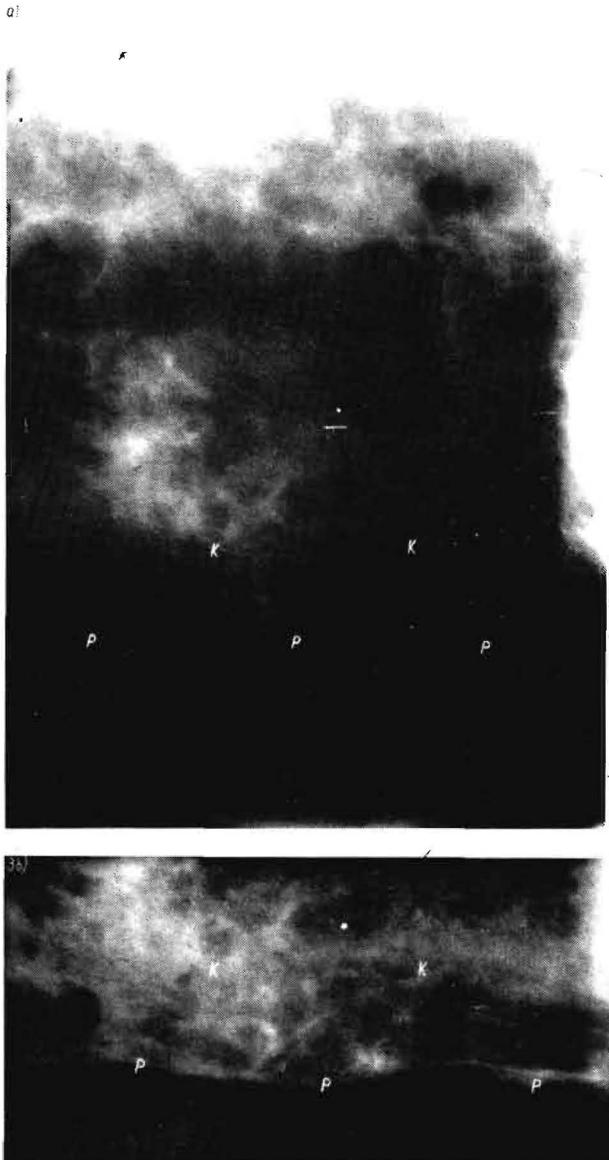
Für Bild 3a ist ein feinkrümeliger Boden mit geringeren Dichteunterschieden als im Bild 2a charakteristisch. Im Interesse der besseren Erkennbarkeit des Bodengefüges im unteren Bereich wurde zusätzlich bei vollem Kontrastausgleich kopiert (Bild 3b). Dadurch sind die Grenze der Pflugbearbeitung (P) und die Krümelstruktur (K) der unmittelbar über der Pflugsohle liegenden Bodenschicht sichtbar geworden.

Durch die Analyse der Schicht- und Schnittbilder ließ sich folgendes feststellen:

- Die kleinste noch erkennbare Aggregatgröße ist abhängig von der Dichte des Bodens und den Dichteunterschieden. Sie liegt im Mittel bei 5 mm, in keinem Fall jedoch über der in den ATF genannten kleinsten Aggregatgröße von 10 mm.
- Bei Sandböden, bei nur verscherten und eingerissenen, aber nicht zerteilten und gelockerten, stark bindigen Lehm- bis Tonböden und bei „natürlich gewachsenen“, nie bearbeiteten

Bild 3. Bodenprobe mit relativ geringen Dichteunterschieden

- a) Röntgenschnittbild
- b) Röntgenschnittbild des unteren Bereichs mit vollem Kontrastausgleich



und in optimalem Zustand befindlichen Böden (z. B. Wiese) kann ein Röntgenschnittbild ebenso wie gebräuchliche Verfahren (z. B. Siebanalyse) keine brauchbaren Informationen über Aggregatgrößen liefern; denn solche Böden sind bezüglich ihrer Dichte durch einen relativ homogenen Zustand gekennzeichnet.

- Ein Röntgenschnittbild liefert immer, auch beim Fehlen von Bodenaggregaten, brauchbare Informationen über die Dichteverteilung.
- Im Boden eingelagerte organische Rückstände (z. B. einzelne Strohhalme) sind im Röntgenschnittbild nicht erkennbar. Sie sind aber bei Anhäufungen indirekt nachweisbar, da diese Anhäufungen Volumeneinheiten geringerer Dichte bilden.

7. Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse der röntgenografischen Untersuchungen weisen eine bodenseitig begrenzte Anwendbarkeit der Bodenzustandsgröße Aggregatgrößenverteilung aus, was besagt, daß sie die Keimungs- und Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen nicht genügend genau und treffend beschreiben kann, wenn sie auch derzeit eine der wenigen Größen ist, mit deren Hilfe in den ATF der Bodenzustand bei Herbst- und Saarfurche quantitativ vorgegeben wird. Außerdem ist der Begriff Aggregat hinsichtlich Bruchkörperform und Durchmesser bei Beachtung möglicher Einrisse im Bruchkörper sowie der Zusammenpressung mehrerer Bruchkörper unzureichend definiert. Es könnte demnach dann auf diese Bodenzustandsgröße verzichtet werden, wenn sich mit Hilfe anderer Zustandsgrößen die Keimungs- und Wachstumsbedingungen genügend genau und umfassend bei jedem Bodenzustand beschreiben lassen.

Wie die mit Röntgenschnittbildern erzielten Ergebnisse zeigen, sind bei jedem Bodenzustand Aussagen über die Dichteverteilung möglich. Diese korreliert — so kann man voraussagen — weitaus stärker als die Aggregatgrößenverteilung mit der Porengrößenverteilung, dem aus pflanzenbaulicher Sicht wohl wichtigsten Charakteristikum des Bodengefüges. Somit gestatten die in Röntgenschnittbildern enthaltenen Informationen über Dichteverteilungen, bei experimentell-theoretischen Werkzeuguntersuchungen unter natürlichen Bodenverhältnissen im Feldeinsatz das Bearbeitungsergebnis mit Hilfe eines pflanzenbaulich bedeutsamen Kriteriums zu beurteilen, was dazu beitragen kann, möglichst bald zu praktisch brauchbaren und effektiveren neuen Werkzeugen zu gelangen.

Bisher wurden in ATF zu pflanzenbaulich günstigen Dichteverteilungen vorwiegend qualitative Aussagen getroffen („homogene Dichteverhältnisse“ u. ä.). Mit Röntgenschnittbildern ist eine Voraussetzung für ausschließlich quantitative und umfassende Aussagen über die Dichteverhältnisse im Boden gegeben. Sie enthalten Informationen über den absoluten Anteil (auszuwerten nach Dichteklassen) und die räumliche Anordnung (auszuwerten nach Bodenteilvolumina gleicher Dichte). Von bekannten Forderungen nach homogenen Dichteverhältnissen ausgehend, lassen sich mit statistischen Maßzahlen einer solchen zweiparametrischen Dichteverteilung der Homogenitätsgrad ausdrücken und in Verbindung mit speziellen Messungen der mittleren absoluten Dichte die Dichteverhältnisse umfassend beschreiben. Von Vorteil für solche Aussagen ist die mögliche hohe räumliche Auflösung beim Auswerten von Röntgenschnittbildern. Sie ergibt sich aus der minimalen Dicke der bevorzugt abgebildeten Bodenschicht (1 bis 2 mm) und der maximal möglichen Anzahl abzutastender Bildpunkte (zu letzterem bietet der Stand der Technik geeignete rationale Verfahren einschließlich solcher der sofortigen Speicherung von Informationen unterschiedlich geschwächter Röntgenstrahlen unter Umgehung bildhafter Darstellungen). Damit ist eine sehr differenzierte Beurteilung von Werkzeugvarianten möglich.

Die mit Röntgenschnittbildern erzielten Ergebnisse bedeuten auch, daß beim Charakterisieren des Bodenzustands mit Hilfe der Dichteverteilung ein gesondertes Erfassen (durch Freigraben o. a.) der Verteilung eingearbeiteter organischer Rückstände (Stoppel, Stallung u. a.) entfallen kann. Ein hoher Homogenitätsgrad schließt eine relativ gleichmäßige Verteilung von Rückstän-

den ein, denn Anhäufungen bilden sich als größere Volumeneinheiten extrem geringer Dichten aus.

Das Beurteilen von Bodenbearbeitungswerkzeugen nach ihrem Einfluß auf die Dichteverteilung setzt erstens die Kenntnis vom Bereich praktisch auftretender Kennwerte dieser Verteilung (unbearbeiteter und bearbeiteter Boden) und zweitens eine bei natürlichen Bodenverhältnissen unter Feldbedingungen einsetzbare (zunächst nur für die Forschungsphase geeignete) Röntgeneinrichtung voraus. Das erste erfordert, die Dichteverteilung künftig in pflanzenbauliche Untersuchungen einzubeziehen, das zweite, eine transportable Feldröntgeneinrichtung zu entwickeln. Die bisher durchgeführten Untersuchungen konnten nur prinzipiell die Anwendbarkeit des Schichtröntgens bestätigen — zwar nicht für das Erfassen der Aggregatgrößenverteilung unter allen Bodenverhältnissen, aber der Dichteverteilung in jedem Fall. Zunächst aber könnten bei pflanzenbaulichen Untersuchungen großvolumige Bodenproben in geringer Anzahl entnommen und zu einer stationären Röntgeneinrichtung transportiert werden, um erste Erfahrungen bezüglich der Methode der Auswertung von Röntgenschnittbildern und der praktisch auftretenden Kennwerte der Dichteverteilung zu sammeln.

8. Zusammenfassung

Das Beurteilen von Werkzeugen nach ihrem Einfluß auf die Aggregatgrößenverteilung im Boden erfordert ein Verfahren für

beschädigungsfreies und möglichst berührungsloses Erfassen von Größe und Lage der Aggregate. Zu diesem Zweck sollte die Eignung des in der Medizin gebräuchlichen Schichtröntgens für Ackerboden geprüft werden. Es wurden an einer stationären Röntgeneinrichtung von großvolumigen Bodenproben Röntgenschnittbilder hergestellt und danach diese mit den entsprechenden Originalschnittbildern der Proben verglichen. Die Ergebnisse bestätigen die bodenseitig begrenzte Anwendbarkeit der Zustandsgröße Aggregatgrößenverteilung. Röntgenschnittbilder ermöglichen aber bei jedem Bodenzustand Aussagen über den Dichtehomogenitätsgrad mit Hilfe von Kennwerten der Dichteverteilung einschließlich der Verteilung eingearbeiteter organischer Rückstände. Für künftige Werkzeuguntersuchungen müßten der Bereich praktisch auftretender Kennwerte der Dichteverteilung ermittelt und eine geeignete Feldröntgeneinrichtung entwickelt werden.

Literatur

- [1] Kollektiv: Normative für die Bodenbearbeitung. agrar-Broschüre 1973
- [2] 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.
- [3] Gebauer, A.: Das Röntgenschnittbild. Stuttgart, Thieme-Verlag 1959. A 1081

Gammastrahlungssonde zur Bodendichtemessung dünner und oberflächennaher Schichten

Dipl.-Ing. M. Hahn, KDT, Institut für Landmaschinentechnik Leipzig des VEB Weimar-Kombinat

Die Lagerungsdichte ist eine wichtige physikalische Bodenzustandsgröße zur Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses von Werkzeugen [1]. Wegen der Heterogenität des Bodengefüges ergeben sich aber Probleme hinsichtlich der Wahl des Meßvolumens und der Versuchsdurchführung. So erfordert das Aufdecken von Beziehungen zwischen Werkzeugparametern und Lagerungsdichte einzelner Bodenschichten eine Reduzierung der in die Dichtebestimmung mit bekannten Strahlungs sonden einbezogenen Schichtdicke.

1. Problemstellung

Aus der pflanzenbaulich begründeten Einteilung der Ackerkrume in

- Bereich bis zur Saatgutablage
- Bereich der Saatgutablage und darunter
- Bereich bis Krumentiefe

und der je nach Fruchtart und Standorteinheit geforderten Dichteverteilung ergibt sich, daß die zu erfassenden Bodenschichten dünner als 5 cm sein sollten. Das Messen der oberflächen- und pflugsohlennahen Schichten muß ebenfalls mit ausreichender Genauigkeit möglich sein.

Die zulässige Meßgenauigkeit leitet sich nach statistischen Beziehungen ab aus der Streuung der Dichte, den Versuchswiederholungen und den als statistisch gesichert nachzuweisenden Dichteunterschieden infolge verschiedener Einwirkungen. Untersuchungen [2] zeigen, daß bei üblichen relativen Streuungen der Bodendichte von 5 bis 10% zum Nachweis pflanzenbaulich bedeutsamer Dichteunterschiede von rd. 3% etwa 100 Einzelmessungen bei einer Meßgenauigkeit von 3% erforderlich sind. Solange keine homogenen Dichten (Variationskoeffizienten < 5%) vorliegen, ermöglicht auch eine Verringerung der Meßgenauigkeit keinen wesentlich geringeren Stichprobenumfang.

Neben zufälligen sind auch systematische Meßfehler zu beachten, die sich u. a. ergeben können aus

- Meßwertverfälschung infolge Streustrahlungseinfluß an den Grenzflächen (Feldoberfläche, Pflugsohle)
- Störung der Bodenlagerung durch die Sondenäste
- Aktivitätsabnahme und
- Verbiegen der Sondenäste.

Zur Realisierung des o.g. Stichprobenumfangs wurde eine Meßzeit von 10 s bei geringen Hilfs- und Nebenzeiten gefordert.

2. Forderungen an eine neu zu entwickelnde Strahlungs sonde

Bekanntes Dichtesonden [3][4] werden der vorliegenden Meßaufgabe nicht gerecht. Mit Auslösezählrohren bestückte Sonden erfassen relativ mächtige Bodenschichten je nach Ausbildung des Streustrahlungsfeldes. Deshalb kann z. B. mit der Einstichgabelsonde DS-10 erst ab einer Tiefe von 8 cm unterhalb der Feldoberfläche unverfälscht gemessen werden [4]. Außerdem sind die notwendigen Meßzeiten von rd. 1 Minute im Hinblick auf den Stichprobenumfang zu hoch.

Durch Wahl einer liegenden Zählrohranordnung bei der Sonde DS-9 und Auflegen eines Streustrahlungskörpers auf die Meßstelle ist eine Möglichkeit gegeben, die Dichte im oberflächennahen Bereich zu bestimmen. Abgesehen von der auch bei diesem Sondentyp erforderlichen hohen Meßzeit ist das Einsatzgebiet wegen der schlechten Einführbarkeit der Sonde in den Boden begrenzt.

Szintillationssonden hingegen zeichnen sich durch sehr kurze Meßzeiten aus. In Verbindung mit stark kollimierten Strahlungsquellen, wie z. B. bei der Sonde DS-2, lassen sich gute räumliche Auflösungen erzielen. Die Abmessungen solcher Sonden erfordern das Anlegen von Erddämmen zur Durchstrahlung. Der damit