

Dichtemessungen an Großballen mit Hilfe des Spitzendrucksondiervfahrens

Von Theodor Hesse und Bernd Scheufler, Braunschweig*)

DK 531.78:631.364

Über die Dichteverteilung eines Halmgutballens konnte bislang keine exakte Aussage gemacht werden. Durch den Einsatz einer neuentwickelten Spitzendruck-Meßsonde ist es möglich, die örtliche Dichte im Ballen während des Einfahrens der Sonde kontinuierlich zu ermitteln. Durch systematische Untersuchungen an verschiedenen Halmgütern wurden für die neue Meßsonde Kalibrierkurven erstellt, die die mathematischen Zusammenhänge zwischen Eindringwiderstand der Sonde und der örtlichen Dichte im Ballen wiedergeben.

1. Einleitung

Für die Bergung des Halmgutes haben sich Ballenpressen in vielen landwirtschaftlichen Betrieben durchgesetzt. In den letzten Jahren treten dabei insbesondere die Rund- oder Rollballenpressen in den Vordergrund, die das geschwadete Halmgut vom Boden aufnehmen, aufrollen und dabei verdichten. Die Vielzahl der auf dem Markt angebotenen Maschinen kann letztlich auf zwei Grundprinzipien zurückgeführt werden, nach denen das Halmgut im Wickelraum verdichtet wird.

In **Bild 1** sind beide Ausführungen dargestellt. Beim linken Verfahren mit angepaßtem Wickelraumdurchmesser wird das in die Maschine gelangte Halmgut ähnlich wie ein Teppich gleichmäßig aufgerollt. Dabei wird die Wickel- und Preßkammer von mehreren nebeneinander umlaufenden, endlosen Bändern gebildet. Diese Bänder sind so geführt, daß der zunächst kleine Ballenraum mit zunehmender Gutzufuhr ständig größer wird, solange, bis der Ballen den gewünschten Durchmesser erreicht hat. Der Ballen wird dann mit Bindegarn spiralförmig umwickelt und anschließend durch Öffnen der Wickelkammerrückwand auf dem Feld abgelegt.

Im Gegensatz zu diesem variablen Wickelraum bilden in der rechten Darstellung die ebenfalls nebeneinander umlaufenden, endlosen Bänder eine Wickelkammer mit konstanten Abmessungen. Das Gut gelangt zunächst locker in die Preßkammer und beginnt unter Rotation allmählich den Wickelraum auszufüllen. Sobald das Halmgut den Preßraummantel an seinem ganzen Umfang berührt, wird bei weiterer Gutzufuhr von außen nach innen ein ständig wachsender radialer Druck auf das Halmgut ausgeübt, wobei sich die inneren Schichten sternförmig zusammenfallen, während von außen noch weitere Halmgutschichten angelegt werden. Anschließend wird der Ballen, wie bei dem zuerst besprochenen Verfahren, spiralförmig mit Bindegarn umwickelt und auf dem Feld abgelegt.

Es ist bekannt, daß die unterschiedlichen Arbeitsweisen auch zu einer unterschiedlichen Dichteverteilung im Ballen führen, deren genaue Kenntnis beispielsweise im Hinblick auf Trocknungs- und Lagerungsprobleme von Bedeutung ist.

2. Aufbau und Funktion der entwickelten Versuchseinrichtungen

Mit einem bereits früher erläuterten Sondiervfahren [1, 2] können nun auf einfache und schnelle Weise Dichtemessungen an Großballen durchgeführt werden [3]. Dieses Meßverfahren hat gegenüber herkömmlichen Verfahren, mit denen eine mittlere Ballendichte bestimmt wird, den Vorteil, daß man erstmalig einen Einblick in die örtliche Ballendichte, d.h. in die Dichteverteilung über den gesamten Querschnitt bzw. über die volle Breite der Ballen erhält.

Bereits früher wurde über das am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig entwickelte Spitzendrucksondiervfahren zur Untersuchung der Druckspannungsverteilung in Körnersilos berichtet. Wie zunächst aus bodenmechanischen Untersuchungen bekannt [4, 5], hatte es sich gezeigt, daß auch für Körnerhaufwerke über den gemessenen Eindringwiderstand der Sondenspitze eine Aussage über die Dichte gemacht werden kann. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, wurde dieses Meßverfahren zur Untersuchung der Dichteverhältnisse in Großballen weiterentwickelt.

2.1 Sondiervfahren

Der Aufbau der Sondiereinrichtung für Großballen ist im **Bild 2** schematisch wiedergegeben. Die Sonde wird kontinuierlich je nach Versuchsanordnung radial oder axial an verschiedenen Stellen durch den Halmgutballen gedrückt. Ein Elektromotor mit Seilwinde d bewirkt über ein Zugseil e den Vorschub des Sondenrohres f . Die beim Eindringen in den Ballen an der Sondenspitze b auftretende Widerstandskraft wird mit Hilfe eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers c gemessen und über einen nachgeschalteten Ladungsverstärker von einem X, Y-Schreiber in Abhängigkeit vom Eindringweg aufgezeichnet.

Die Vielzahl der Einflüsse auf die Verformungs-, Spannungs- und Dichtezustände vor der Sondenspitze und damit auf den Sondiervorgang macht eine Analyse der Einflußfaktoren erforderlich, die sowohl vom untersuchten Material als auch vom Aufbau der Sonde abhängen:

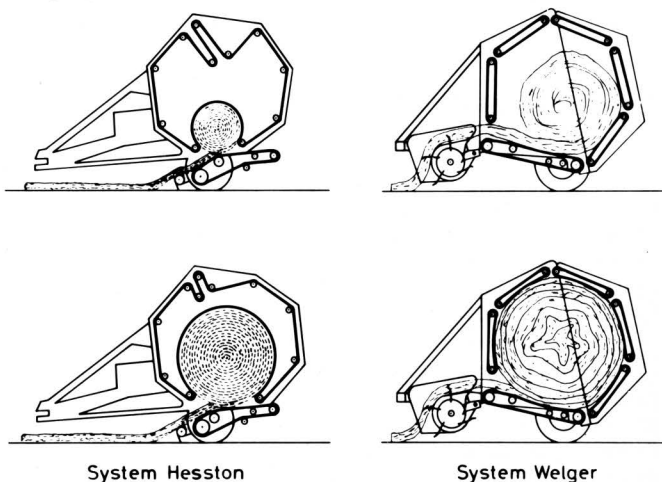


Bild 1. Arbeitsweisen von Rundballenpressen.

*) Dipl.-Ing. Th. Hesse und Dipl.-Ing. B. Scheufler sind wissenschaftliche Assistenten am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig

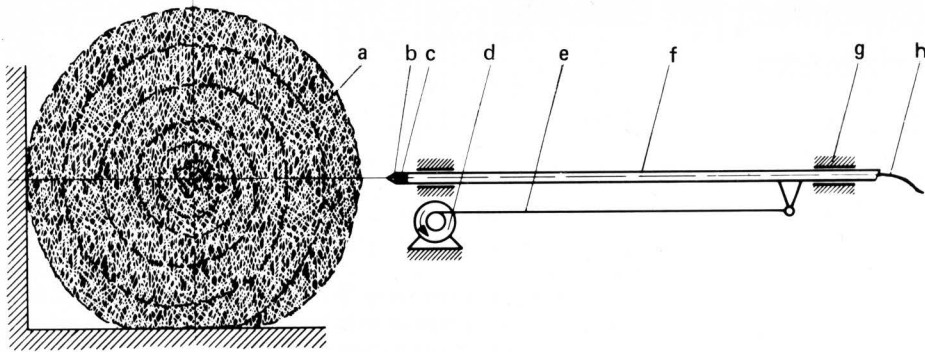


Bild 2. Spitzendrucksondiereinrichtung.

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| a Halmgutballen | e Zugseil |
| b Sondenspitze | f Sondenrohr |
| c piezoelekt. Kraftaufnehmer | g Sondenführung |
| d Elektromotor mit Seilwinde | h Verbindungskabel zum Meßverstärker |

örtliche Dichte des Halmgutballens
 Gutart
 Halmstruktur
 Feuchtegehalt
 Sondendurchmesser
 Kegelspitzenwinkel
 Sondierrichtung
 Sondiergeschwindigkeit.

Dabei können veränderbare Größen, wie beispielsweise die Form oder Größe der Sondenspitze, so gewählt werden, daß sich ein brauchbares Meßverfahren ergibt.

Der in **Bild 3** dargestellte einfache Aufbau der Sondenspitze macht es möglich, sowohl den Kegelspitzenwinkel als auch den Kegeldurchmesser zu variieren. Es wurden bisher Spitzen mit einem Spitzenwinkel von 15, 30, 45 und 60° sowie einem Durchmesser von 18 und 24 mm untersucht. Die hier abgebildete Sondenspitze hat beispielsweise einen Spitzenwinkel von 30° und einen Durchmesser von 18 mm.

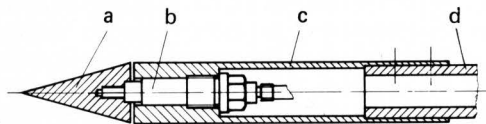


Bild 3. Aufbau der Meßsonde.

- | | |
|--|-----------------|
| a Sondenspitze | c Anschlußstück |
| b piezoelekt. Kraftaufnehmer mit Stecker für Kabelanschluß | d Sondenrohr |

2.2 Ermittlung der tatsächlichen örtlichen Dichte

Wie bereits angedeutet, erlaubt die Messung des Eindringwiderstandes der Spitzendrucksonde zunächst nur eine qualitative Aussage über die Dichteverhältnisse im Halmgutballen. Um eine quantitative Aussage über die örtliche Dichte machen zu können, muß eine Zuordnung zwischen Eindringwiderstand und Dichte gefunden, d.h. eine Kalibrierkurve erstellt werden. Dazu werden aus dem Ballen einzelne Volumenelemente entnommen und gewogen und so deren Dichten bestimmt, die den vorher ermittelten örtlichen Eindringwiderständen zugeordnet werden.

Bild 4 zeigt die speziell dafür entwickelte Bohreinrichtung. Sie besteht im wesentlichen aus einer Art Bohrkronen oder Lochsäge. Der pendelnd aufgehängte Antrieb ermöglicht einen durch die Bedienungsperson dosierten Vorschub des Bohrers. Durch absätziges Bohren, bei dem jeweils das herausgeschnittene Halmgut gewogen und die zugehörige Bohrtiefe gemessen wird, können die mittleren Dichten dieser Volumina und damit die örtlichen Dichten im Ballen einfach und genau bestimmt werden.

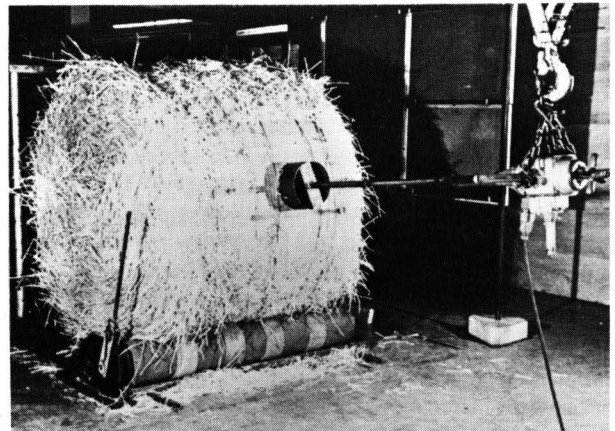


Bild 4. Vorrichtung zur Entnahme von Volumenelementen aus dem Halmgutballen.

3. Experimentelle Versuchsergebnisse

Gepreßtes Halmgut kann nicht als homogene Masse angesehen werden. Um verbindliche Schlüsse aus Experimenten mit diesem Material ziehen zu können, ist eine Vielzahl von Versuchen nötig, von denen hier nur eine begrenzte Anzahl aufgeführt ist.

3.1 Zuordnung zwischen Eindringwiderstand und tatsächlicher örtlicher Dichte

Aus einer Vielzahl der an verschiedenen Ballen gewonnenen Meßschiebe für den Eindringwiderstand und den an gleicher Stelle ermittelten Werten für die Dichte konnte eine Zuordnung der beiden Größen gefunden werden. In **Bild 5** sind beispielsweise Kalibrierkurven für Roggenstroh, Weizenstroh und Wiesenheu dargestellt. Es ist zu erkennen, daß Gutarten ähnlicher Halmstruktur – in diesem Fall Roggen- und Weizenstroh – auch zu annähernd gleichem Kalibrierergebnis führen. Die eingetragenen Kurven zeigen, daß mit Wachsen der Eindringwiderstände die zugehörige Dichte weniger als linear ansteigt. Die Zusammenhänge lassen sich durch eine einfache e-Funktion wiedergeben. Hervorzuheben ist, daß die eingetragenen Meßpunkte im unteren und mittleren Dichtebereich aus Messungen an Ballen von Maschinen mit sich anpassendem und konstantem Wickelraum ermittelt wurden, die Punkte für große Dichten dagegen nur an Ballen von Maschinen mit konstantem Wickelraumabmessungen. Dadurch wird nachgewiesen, daß die eingangs erwähnten unterschiedlichen Arbeitsweisen der einzelnen Rollballenpressen sich nicht in unterschiedlichen Kalibrierkurven niederschlagen.

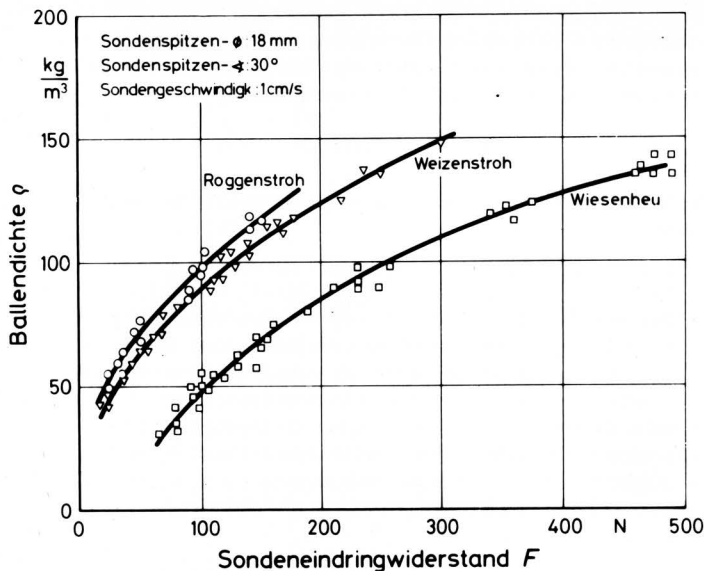


Bild 5. Zuordnung der Dichte zum Eindringwiderstand für verschiedene Halmgüter.

In **Bild 6** ist der Einfluß des Kegelspitzenwinkels dargestellt. Für die Winkel 15, 30 und 45° ist am Beispiel von Weizenstroh wiederum die jeweilige örtliche Ballendichte über dem Meßergebnis des Sondeneindringwiderstandes aufgetragen. Wie nicht anders zu erwarten war, führen spitze Kegel bei gleichem Durchmesser zu geringeren Eindringwiderständen als stumpfe. Zu bemerken ist allerdings, daß schlanke Kegel wegen der großen Kegelhöhe keinen exakt zu definierenden örtlichen Bezugspunkt der Sondenspitze ergeben wie auch örtliche Dichteschwankungen infolge eines Ausgleicheffektes weniger genau registrieren. Bei zu stumpfen Kegeln dagegen wird das Halmgut sehr ungleichmäßig von der Sonde durchstoßen, d.h. die Spitze schiebt das Halmgut zunächst vor sich her, verdichtet es dabei und platzt schließlich durch diese Gutschicht, wonach sich der Vorgang wiederholt. Ein Optimum der untersuchten Spitzenwinkel lag bei 30°; dieser Winkel kann daher für zukünftige praktische Untersuchungen besonders empfohlen werden.

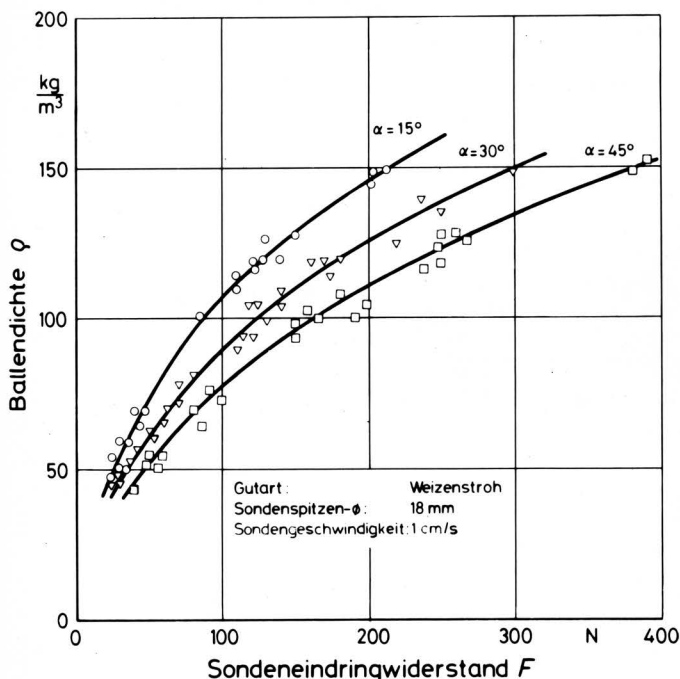


Bild 6. Zuordnung von Dichte und Eindringwiderstand für verschiedene Spitzenwinkel der Sonde.

Als weiterer Parameter wurde der Sondendurchmesser untersucht. Der Eindringwiderstand wächst nicht, wie zunächst vermutet, proportional mit der Kegelgrundfläche, d.h. dem Quadrat des Sondendurchmessers, sondern erfährt eine erheblich größere Steigerung. Beispielsweise brachte eine Vergrößerung des kleinsten, baulich bedingten Spitzendurchmessers von 18 mm auf 24 mm, also eine Verdickung um 1/3, eine Erhöhung der Spitzenkraft um den Faktor 3. Dieses Ergebnis sollte vor allem bei einer Optimierung der Meßsonde zur Vermeidung unnötig großer Antriebskräfte berücksichtigt werden.

Eine Variation der Sondiergeschwindigkeit im Bereich von 0,2 bis 2 cm/s – also um den Faktor 10 – brachte keine nennenswerten Unterschiede des Eindringwiderstandes. Für den praktischen Einsatz genügt daher ein kleiner Antriebsmotor, bzw. es kann eine große Untersetzung eingebaut werden.

3.2 Vergleich der beiden Wickelverfahren anhand von Meßschrieben

Zwei als Beispiel herausgegriffene Meßschriebe sollen den Verlauf des gemessenen Eindringwiderstandes und der daraus ermittelten örtlichen Ballendichte in Abhängigkeit vom Ballendurchmesser verdeutlichen. Dabei zeigt sich, daß sich je nach Arbeitsweise der Maschine unterschiedliche Dichteverteilungen im Ballen einstellen.

In **Bild 7** ist das Meßergebnis eines Ballens aus einer Maschine mit sich anpassendem Wickelraumdurchmesser dargestellt. Das Diagramm enthält zwei Kurven. Auf der Ordinate ist für die untere Kurve links der Sondeneindringwiderstand, für die obere Kurve rechts die Ballendichte aufgetragen. Die untere Kurve gibt den Meßschrieb des Sondeneindringwiderstandes in Abhängigkeit von der Sondeneindringtiefe wieder, d.h. der Weg der Sonde auf einem Ballendurchmesser in diesem Fall von 0 bis 175 cm. Die obere Kurve mit den eingetragenen Meßpunkten zeigt die mit Hilfe des Bohrverfahrens ermittelte örtliche Ballendichte. Beide Kurven haben die gleiche Tendenz, sie steigen zunächst an und verlaufen über dem weiteren Sondengang mehr oder weniger gleichmäßig, um an der gegenüberliegenden Ballenseite wieder abzufallen. Bei genauer Betrachtung beider Kurvenverläufe stellt man fest, daß die mit der Sonde gemessenen Spitzen nicht unbedingt mit den örtlichen Maxima und Minima des über das Bohrverfahren ermittelten Dichteverlaufes übereinstimmen. Die Erklärung liegt darin, daß örtliche Dichteschwankungen vom Sondierverfahren wesentlich genauer angezeigt werden, als sie über das Bohrverfahren ermittelt werden können. Beim Bohren ist man zwangsläufig

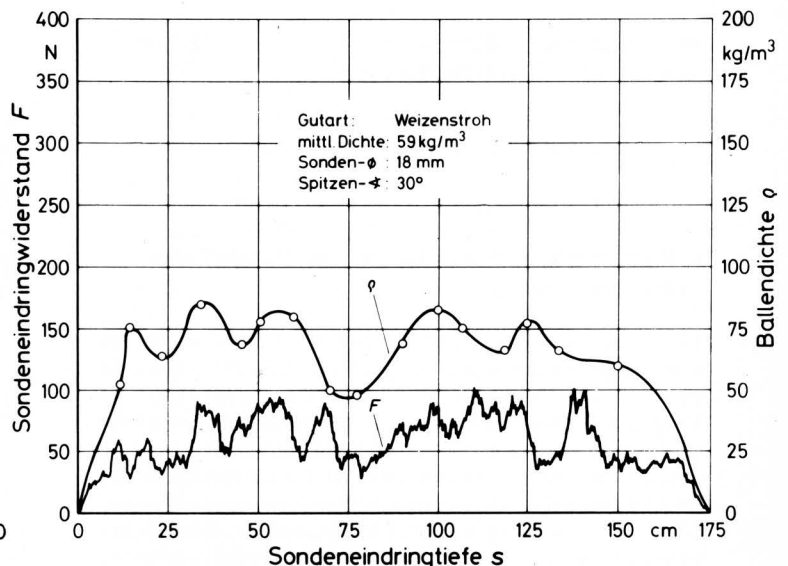


Bild 7. Eindringwiderstand und Dichteverlauf im Großballen (sich anpassender Wickelraum-Durchmesser).

fig auf bestimmte Probendicken angewiesen: Zu dünne Scheiben sind bei der Dickenmessung mit einer relativ großen Meßgenauigkeit behaftet und führen daher auch zu einer größeren Streuung der ermittelten Dichten, zu dicke Scheiben ergeben immer nur über den größeren entnommenen Bereich gemittelte Werte. Die markanten Kurvenspitzen der Meßsonde deuten demnach wie auch im nächsten Bild auf die einzelnen Halmgutschichten hin, die beim Bohrverfahren nicht alle einzeln erfaßt werden können.

Zum Vergleich mit dem vorherigen Bild zeigt **Bild 8** einen typischen Meßschieb für einen Ballen aus einer Maschine mit konstantem Wickelraumdurchmesser. Mit dem gleichen Maßstab wie zuvor sind hier wieder der Sondeneindringwiderstand und der Dichteverlauf einander gegenübergestellt. Beim Vergleich mit **Bild 7** erkennt man den steilen Anstieg der Kurven mit anschließendem Abfall. Im mittleren Bereich liegt mit Ausnahme der direkten Ballenmitte, wo aufgrund der starken Faltung des Halmgutes wieder ein leichter Anstieg zu erkennen ist, ein fast gleichmäßiger Verlauf vor, der Wert der Dichte stimmt hier etwa mit dem vorherigen Bild überein. Auf die Bedeutung der sehr dichten Außenschicht in der landwirtschaftlichen Praxis soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

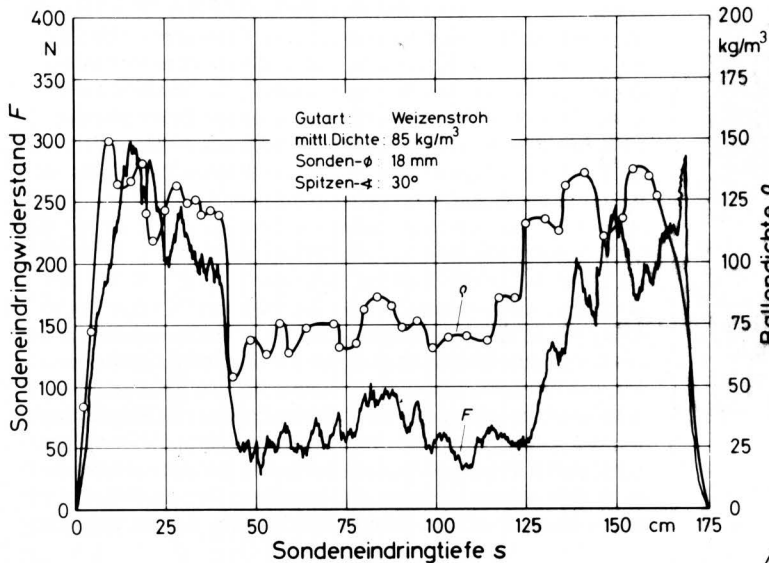


Bild 8. Eindringwiderstand und Dichteverlauf im Großballen (konstanter Wickelraum-Durchmesser).

4. Mathematische Formulierung und Überprüfung der Ergebnisse

Die im **Bild 5** und **6** hergestellten graphischen Zuordnungen zwischen Eindringwiderstand F und Dichte ρ lassen sich näherungsweise durch mathematische Funktionen ausdrücken [3]. Die Haupteinflüsse wie veränderlicher Kegelspitzenwinkel α und Sonden­durchmesser d lassen sich durch Korrekturglieder a_α und a_d erfassen, die, wie sich herausgestellt hat, für alle Halmgüter annähernd gleich sind. Die Gutart kann durch ein entsprechendes Glied a_G berücksichtigt werden. Die allgemeine mathematische Formulierung der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Kalibrierkurve lautet damit:

$$\rho = f(F, a_\alpha, a_d, a_G) \quad (1).$$

Für die Messungen an Weizenstroh mit einer Sonde mit dem Spitzenwinkel $\alpha = 30^\circ$ und dem Durchmesser $d = 18 \text{ mm}$ läßt sich für den im Ballen praktisch auftretenden Dichtebereich die Kalibrierkurve recht gut durch die Zahlenwertgleichung

$$\rho = 75,2 [\ln(F + 60,3) - 3,9] \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

annähern, wobei der gemessene Eindringwiderstand F in N einzusetzen ist.

Über diese Beziehung kann auf einfache Weise aus dem gemessenen Verlauf des Eindringwiderstandes im Ballen der gesuchte Dichteverlauf ermittelt werden. Aus der örtlichen Ballendichte und den geometrischen Abmessungen des Ballens kann darüber hinaus die Gesamtmasse des Ballens rechnerisch bestimmt werden. Ein Vergleich mit der durch Wägung festgestellten tatsächlichen Masse gibt Aufschluß über die Richtigkeit der durchgeführten Messungen und der abgeleiteten mathematischen Zusammenhänge. Allgemein läßt sich die Masse eines Körpers mit rotationssymmetrischer Form und Dichteverteilung durch folgendes Integral berechnen:

$$m = 2\pi \int_0^R \int_0^l r \rho(r) f(z) dr dz \quad (3).$$

Hierin gibt $\rho(r)$ den Dichteverlauf in radialer Richtung und $f(z)$ die Dichteverteilung in axialer Richtung an.

Für die Lösung dieses Doppelintegrals müssen die Funktionen $\rho(r)$ und $f(z)$ mathematisch ausgedrückt werden. Der aus den zahlreichen Messungen – sondiert wurde in radialer Richtung – ermittelte Verlauf des Eindringwiderstandes wurde sowohl in radialer als auch in axialer Richtung des Ballens linearisiert und ist in **Bild 9** wiedergegeben. Die für diese Darstellung verwendeten Meßschiebe stammen von Versuchen an einem Weizenstrohballen aus einer Presse mit konstantem Wickelraum.

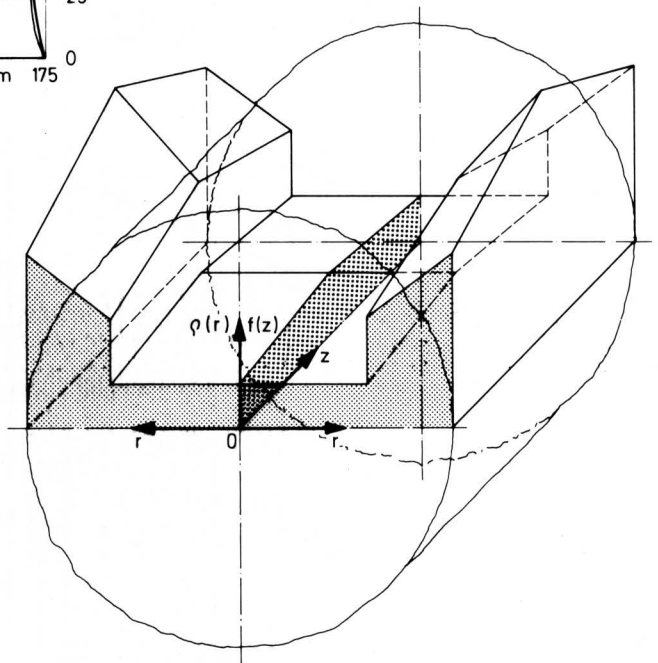


Bild 9. Dichteverteilung im Halmgutballen (schematisch, konstanter Wickelraum-Durchmesser).

Die linearisierten Beziehungen für den Eindringwiderstand in der mittleren Ballenebene – F in N – können in 2 Bereiche aufgeteilt werden:

$$\begin{aligned} F &= 50 && \text{für } 0 \leq r \leq 0,44 \text{ m} \\ F &= 183 r + 60 && \text{für } 0,44 \text{ m} \leq r \leq 0,85 \text{ m.} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen dieser Beziehungen in Gl. (2) ergeben sich ebenfalls 2 Dichtebereiche:

$$\rho_I = 61,01 \quad \text{für } 0 \leq r \leq 0,44 \text{ m} \quad (4),$$

$$\rho_{II} = 75,2 \ln(3,74 r + 2,46) \quad \text{für } 0,44 \text{ m} \leq r \leq 0,85 \text{ m} \quad (5).$$

Damit sind die Beziehungen für den Dichteverlauf in radialer Richtung in der mittleren Ballenebene hergestellt. Der Verlauf in axialer Richtung ausgehend von den Stirnflächen des zylinderförmigen Halmgutballens läßt sich mit der Funktion

$$f(z) = 0,75 z + 0,55 \quad \text{für } 0 \leq z \leq 0,6 \text{ m} \quad (6)$$

beschreiben.

Durch Einsetzen der Gln. (4) bis (6) in Gl. (3) wird das Integral zu

$$\begin{aligned} m &= 2 \pi \int_0^{0,6} 2(0,75 z + 0,55) dz \left\{ \int_0^{0,44} 61,01 r dr + \right. \\ &\quad \left. + \int_{0,44}^{0,85} r 75,2 \ln(3,74 r + 3,46) dr \right\} \quad (7). \end{aligned}$$

Nach einer Zwischenrechnung, z.B. auch in [3], erhält man als Lösung für die Masse den Wert

$$m \approx 220 \text{ kg.}$$

Diese errechnete Masse liegt um 7 % höher als der durch Wägung des Ballens ermittelte Wert. Im Rahmen der Meßgenauigkeit und der vorgenommenen Linearisierungen ist dies eine so geringe Abweichung, daß die Brauchbarkeit der gefundenen mathematischen Zusammenhänge hiermit als bestätigt angesehen werden kann.

5. Ausbau des Meßverfahrens für den praktischen Einsatz

In der oben dargestellten theoretischen Untersuchung wurde davon ausgegangen, daß die Korrekturglieder sowohl für die geometrischen Einflußgrößen (Spitzenwinkel α und Durchmesser d) als auch für die Gutart bekannt sind. Beim späteren praktischen Einsatz dieser neuen Meßsonde wird aber in der Regel der Einfluß des untersuchten Halmgutes und damit das entsprechende Korrekturglied unbekannt sein, dagegen läßt sich die Gesamtmasse des Ballens auch auf dem Felde durch Wägung relativ einfach ermitteln.

Geht man davon aus, daß sich die Charakteristiken der Kalibrierkurven, die unter anderem von den Einflußgrößen der Meßsonde bestimmt werden, übertragen lassen, so läßt sich die genaue mathematische Beziehung auch wie folgt ermitteln:

Unbekannt in der allgemeinen mathematischen Darstellung der Kalibrierkurve ist lediglich das Korrekturglied a_G . Mit den linearisierten Spitzenkraftverläufen, der gewogenen Masse des Ballens und dem Integral Gl. (3) entsteht eine Gleichung mit der einen Unbekannten a_G , deren Wert durch zweifache Integration zu ermitteln ist. Die Kalibrierkurve ist somit bekannt.

6. Zusammenfassung

Das aus der Bodenmechanik bekannte Spitzendruck-Sondierverfahren wurde für Dichteuntersuchungen an Großballen weiterentwickelt. Dazu wird eine Sondenspitze stetig in das verdichtete Halmgut eingefahren. Der an der Spitze fortlaufend gemessene Eindringwiderstand ist ein Maß für die dort vorhandene örtliche Ballendichte. Mit Hilfe einer speziell dafür entwickelten Bohreinrichtung konnte eine Zuordnung zwischen Eindringwiderstand und Dichte in Form einer Kalibrierkurve, die eine Logarithmenfunktion darstellt, geschaffen werden. Aufgrund des funktionalen Zusammenhangs zwischen Eindringwiderstand und der örtlichen Dichte kann bei Messungen mit der Spitzendrucksonde eine große Genauigkeit, wie die theoretische Überprüfung bewies, bei der Dichtermittlung erzielt werden.

Der besondere Vorteil des neuen Sondierverfahrens gegenüber der bisher üblichen Ermittlung der Ballendichte aus dem Gesamtgewicht des Ballens und dem Ballenvolumen besteht darin, daß man auf sehr einfache und billige Weise einen genauen Einblick in die Dichteverteilung über den gesamten Ballenquerschnitt und die volle Ballenbreite erhalten kann.

Schrifttum

- [1] Hesse, Th.: Das Spitzendrucksondieren – Ein Meßverfahren zur Bestimmung der Druckverteilung in einem Schüttgut-Silo. Grndl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 3, S. 73/78.
- [2] Hesse, Th. u. W. Borß: Einsatz einer Spitzendrucksonde im Großsilo. Grndl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 1, S. 13/17.
- [3] Scheufler, B.: Dichtemessungen an Großballen. Diplomarbeit am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig 1976.
- [4] Melzer, K.-J.: Sondenuntersuchungen im Sand. Mitt. Inst. Verkehrswasserb., Grndb. und Bodenmech. TH Aachen Nr. 43 (1968).
- [5] DIN 4094 Blatt 2 (Vornorm): Baugrund; Ramm- und Drucksondiergeräte, Hinweise für die Anwendung. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1965.