

(Bild 13, Zone II) unwirtschaftlich. Das gilt zumindest für spezialisierte Betriebe der Kälberaufzucht. In Sonderfällen (Versuchsbetriebe) gelten möglicherweise andere Zwänge.

Nun lehrt die Erfahrung, daß das Kalb, ohne Schaden zu nehmen, mit übermäßiger Wärme fertig wird, wenn es klinisch gesund ist und die Umgebungsluft am Körper entlang strömt, um die Wärme abzuführen. Durch Intensivierung der Atmung, im wesentlichen durch Erhöhung der Atemfrequenz, kann überschüssige Wärme abgeführt werden, so daß die Körpertemperatur auf dem physiologischen Wert von 39 °C gehalten werden kann. Die Einatemluft wird im Sommer, auch bei hohen Wärmegehalten keimarm sein, weil infolge intensiver Lüftung der Keimgehalt der Stallluft niedrig ist.

Es ist üblich, die wärmetauschenden Hüllflächen der Kälberställe mit relativ dicken Wärmedämmpaketen auszuführen. Dadurch verbleibt ein hoher Anteil sensibler tierischer Wärme in der Stallluft, da der Transmissionswärmeverlust vermindert wird. Die Folge sind niedrige Werte der relativen Luftfeuchte. Diese Tatsache in Verbindung mit der relativ trockenen Außenluft macht die Stallluft als Einatemluft zu trocken. Da sich diese Tendenz mit steigenden Außenlufttemperaturen und verminderten Transmissionswärmeverlusten oder gar Transmissionswärmegewinnen verstärkt, wird als untere Grenze der relativen Luftfeuchte für die sommerliche Stallluft $\varphi = 50\%$ verlangt. Die Schäden durch Atemwegserkrankungen sind größer als der Aufwand für Befeuchtungsanlagen.

4. Zusammenfassung des Teiles I

Nach der einleitenden Definition wird als wesentlicher Teil des biologischen Stallklimas die Aufbereitung extremer Außenluft (bei winterlicher Kälte und sommerlicher Hitze) zu physiologischer Zuluft gefordert. Direkte Zuführung von zu kalter und zu trockener Außenluft in den Stall wird abgelehnt. Die optimalen Bereiche der thermodynamischen Größen für die 4 Jahreszeiten werden im h, x -Diagramm vorgestellt und die zugehörigen Außenluftmassenströme präzisiert. Dabei werden die physiologischen Abläufe in den Atemwegen mit physikalischen Größen gedeutet. Es wird deutlich ge-

macht, warum zu trockene und zu feuchte Luft nachteilig ist, und warum kalte, saubere Luft die Konzentration an Stäuben, Keimen und Schadgasen in den Atemwegen verringert.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • *Hahn, E.*: Die Haustiere und ihre Beziehung zur Wirtschaft des Menschen.
Leipzig: Verlag Duncker u. Humblot 1896, S. 75.
- [2] *Groth, W.*: Hygienische Ansprüche in der Tierhaltung.
Fachreferat in KTBL-Arbeitsgemeinschaft "Agrartechnik in der Tierhaltung", Darmstadt 15.6.1978.
- [3] *Abshoff, A.*: Kälberaufzucht, Jungviehhaltung, Rindermast.
Baubriefe Landwirtschaft Heft 26 (1983), S. 37.
Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag.
- [4] *Englert, G.*: Zur Wirtschaftlichkeitsprüfung des Einsatzes von Luft/Luft-Wärmetauschern in Ställen.
Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 4, S. 90/97.
- [5] DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen: Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung.
Berlin: Beuth-Verlag 1974.
- [6] *Bianca, W.*: Anpassung des Haustieres an seine klimatische Umwelt.
Schweiz. Landw. Forschung Bd. 10 (1971) Heft 2/3, S. 155/205.
- [7] *Abshoff, A.*: Die künstliche Kühlung von Schweineställen.
Diss. Univ. Kiel 1973.
- [8] *Daenicke, R. u. J. Piotrowski.*: In ungedämmten Ställen bleiben Kälber gesund und munter.
Die landtechnische Zeitschrift — dlz Bd. 34 (1983) Nr. 9, S. 1180/85.
- [9] • *Steimle, F.*: Klimakursus. Berichte aus der Kälte-, Wärme-, Klima- und Regeltechnik; Bd. 1, Die physikalischen Grundlagen der Luftbehandlung, S. 36/53.
Karlsruhe: Verlag C.F. Müller 1970.

Einflußgrößen auf das Spitzendruck-Sondierverfahren beim Einsatz in Schüttgutsilos

Von Theodor Hesse, Geesthacht*)

DK 621.642.3:531.787:531.223

Mit einer Spitzendrucksonde, die in das Schüttgut eines Silos eingefahren wird, läßt sich grundsätzlich eine Aussage über die dortige Druckspannungsverteilung machen. In Ergänzung zu zwei bereits erschienenen Aufsätzen [1, 2], in denen der Sondiervorgang und die Spannungs- und Verformungszustände vor der Sondenspitze erläutert sowie der erfolgreiche Einsatz der Sonde im Modell- und im Großsilo beschrieben wurden, wird an dieser Stelle über die Einflußgrößen von Sonde und Schüttgut berichtet, die eine Rückwirkung auf den Eindringwiderstand und damit auf das Meßergebnis zeigen.

*) Dr.-Ing. Th. Hesse war wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig und ist nach 4jähriger Industriepraxis jetzt als Professor an der Fachhochschule Hamburg tätig.

Inhalt

- 1. Einleitung
- 2. Grundlegende Betrachtungen
 - 2.1 Einflußgrößen bei bodenmechanischen Untersuchungen mit der Spitzendrucksonde
 - 2.2 Bruchverhalten des Bodens bzw. des Schüttgutes
 - 2.3 Berechnungsgleichung
 - 2.4 Versuchstechnische Einflußfaktoren
- 3. Versuchsaufbau
 - 3.1 Aufbau der Spitzendrucksonde
 - 3.2 Aufbau des Versuchsstandes
- 4. Experimentelle Ergebnisse
 - 4.1 Einflußbereich vor und neben der Sonde
 - 4.2 Einfluß der Sondenkörperlänge
 - 4.3 Einfluß der Sondenkörperrauigkeit
 - 4.4 Einfluß der Sondierichtung
 - 4.5 Einfluß des Spitzendurchmessers
 - 4.6 Einfluß des Kegelwinkels und der Oberflächenrauigkeit der Sondenspitze
 - 4.7 Einfluß der Sondiergeschwindigkeit
 - 4.8 Einfluß der Schüttdichte
- 5. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Zur weiteren Erforschung der Druckspannungsverteilung in Silos wurde am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig eine Meßsonde entwickelt, die kontinuierlich in das Schüttgut eingefahren wird und dabei die Bestimmung der Druckspannungsverteilung im Silo ermöglicht.

In zwei zuvor in dieser Zeitschrift erschienenen Aufsätzen [1, 2] wurde bereits über erste Ergebnisse mit diesem neuen Meßverfahren berichtet, das sowohl bei Messungen in Modellsilos als auch in Großsilos eingesetzt werden kann.

Ausgehend von Drucksonden auf dem Gebiet der Bodenmechanik zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Tiefgründungen konnte zunächst der direkte Zusammenhang zwischen dem örtlichen Eindringwiderstand der Sondenspitze und der vor dem Eindringen der Sonde dort herrschenden maximalen Ruhedruckspannung experimentell bestätigt werden. In [1] wurde auch in Anlehnung an die Bodenmechanik, auf die die Haufwerksmechanik häufig zurückgreift, kurz der theoretische Zusammenhang zwischen der (hier im Silo gesuchten) Ruhedruckspannung und dem (meßbaren) Eindringwiderstand der Sondenspitze dargelegt. (Eine ausführliche Darstellung der beim Einsatz der Sonde zu berücksichtigenden theoretischen und versuchstechnischen Grundlagen sowie eine Übersicht über die wichtigsten Versuchsergebnisse findet sich in [3].)

Im Verlauf dieser Untersuchungen zeigte sich, daß der Eindringwiderstand der Sondenspitze außer von der Ruhedruckspannung mehr oder weniger stark von zusätzlichen Parametern, insbesondere versuchstechnischen Einflußfaktoren, abhängig ist. Über diese Versuchsergebnisse, d.h. also die grundlegenden Untersuchungen zur Erprobung der Spitzendruck-Meßsonde soll hier berichtet werden. Es wird dabei vor allem auf Einflußgrößen von Sonde und Schüttgut näher eingegangen, die eine eventuelle Rückwirkung auf den Eindringwiderstand vermuten lassen. Diese Ergebnisse ermöglichen schließlich die Entwicklung einer neuen Sondenbauform, der sog. 3-Komponenten-Meßsonde. Über den Aufbau und die Versuchsergebnisse dieser verbesserten Sonde, mit deren Hilfe dann die Druckspannungen in Silos unter den verschiedensten Bedingungen und für die unterschiedlichsten Güter ermittelt werden können, wird in einem späteren Beitrag [4] berichtet.

2. Grundlegende Betrachtungen

Bei der Entwicklung der neuen Meßsonde wurde von der aus bodenmechanischen Untersuchungen bekannten Spitzendrucksonde ausgegangen, die neben anderen Verfahren als Hilfsmittel zur Überprüfung der Bodenverhältnisse bei Gründungen eingesetzt wird, um vor allem über die Tragfähigkeit eines Bodens Aufschluß zu geben [5, 6]. Die Spitzendrucksonde wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit in den Boden gedrückt, wobei der auf die Sondenspitze wirkende Eindringwiderstand in Abhängigkeit von der Sondertiefe gemessen und aufgetragen wird.

2.1 Einflußgrößen bei bodenmechanischen Untersuchungen mit der Spitzendrucksonde

Bei Anwendung des Spitzendruck-Sondiervorgangs kann davon ausgegangen werden, daß der Sondiervorgang als Modellversuch einer Pfahlgründung anzusehen ist, für die bereits Berechnungsunterlagen vorliegen. Beim Einfahren der Sonde muß das dem Sondenvolumen entsprechende Körnervolumen verdrängt werden. Neben der Schüttdichte ist vor allem die Auflast, d.h. die ursprünglich im Schüttgut vorhandene vertikale Druckspannung für den Eindringwiderstand ausschlaggebend, z.B. [5, 6, 7]. Sie beeinflusst die Größe und den Ablauf der Fließ-, Verdrängungs- und Brucherscheinungen. Darüber hinaus zeigt die Praxis, daß die Belastbarkeit eines Pfahles bzw. Fundamentes von weiteren Parametern abhängig ist, die in der Regel wiederum eng miteinander verknüpft sind.

Der Eindringwiderstand wird im wesentlichen von den folgenden zwei Kenngrößengruppen beeinflusst:

1. Kenngrößen der Sonde bzw. des Pfahls:
 - Querschnittsform (z.B. rund, quadratisch, rechteckig)
 - Querschnittsfläche (groß oder klein)
 - Spitzwinkel (ebenes Fundament als Grenzfall)
 - Oberflächenrauigkeit des Fundamentfußes
 - Schaftform
 - Schafttrauhigkeit
 - Belastungsrichtung
 - Belastungsgeschwindigkeit.
2. Kenngrößen des Versuchsgutes:
 - Korngröße
 - Kornform
 - Kornverteilung
 - mittlere Schüttdichte ρ_S bzw. Hohlraumvolumen oder Porenziffer ϵ
 - Verformbarkeit des Einzelkornes sowie der gesamten Schüttgutsäule
 - innerer Reibungswinkel φ .

Die Vielzahl der Einflußgrößen läßt sich aber nicht theoretisch exakt erfassen [6], da sich das zu untersuchende Schüttgut weder als ideal plastisches noch als rein elastisches Haufwerk verhält [3]. Für eine mathematische Behandlung des Problems müssen daher bestimmte Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen werden.

2.2 Bruchverhalten des Bodens bzw. des Schüttgutes

Die aus der Bodenmechanik bekannten theoretischen Ansätze zur Berechnung des Eindringwiderstandes bzw. der Grenzbelastung eines Fundamentes gehen in der Mehrzahl zunächst von einem unzusammendrückbaren, starr-plastischen Kontinuum als Boden aus; sie unterscheiden sich im wesentlichen durch die Form der im Erdreich auftretenden Bruchfigur. In diesem Zusammenhang spricht man von der Gleitflächentheorie und dem sogenannten Grundbruch. (Außer in den einschlägigen Lehrbüchern ist vor allem in [6] und [8] eine ausführliche Zusammenstellung darüber zu finden.)

Die tatsächliche Bruchfigur unter Tiefgründungen bei zusammendrückbarem Boden – wie er in der Praxis nun einmal vorkommt – zeigt, daß die Fließgrenze nur in einem örtlich begrenzten Bodenbereich erreicht wird. Da es aber für diesen praktisch interessanten Fall noch keine brauchbare theoretisch begründete Berechnung gibt [9], wird sehr häufig der Aufbau der gebräuchlichen Grundbruchgleichung für unzusammendrückbaren Boden nach der Gleitflächentheorie beibehalten, so auch in [10]. Dieser so formulierte theoretische Ansatz wird in der Regel durch Einführung eines oder mehrerer Korrekturfaktoren den tatsächlichen Gegebenheiten angeglichen. Dieser Weg wurde auch hier bei der Auswertung der Meßergebnisse der neuen Meßsonde eingeschlagen.

2.3 Berechnungsgleichung

Zum besseren Verständnis des folgenden sei die nach der Gleitflächentheorie abgeleitete und bereits in [1] speziell für die Anwendung des Sondiervorgangs im Silo erläuterte Berechnungsgleichung noch einmal aufgeführt:

$$\sigma_v = \frac{F_S}{A_S} \frac{1}{\lambda_t \nu_t} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- σ_v die infolge des Guteigengewichtes in einer bestimmten Tiefe herrschende vertikale Ruhedruckspannung,
- F_S die Tragfähigkeit oder Grenzlast eines Pfahles bzw. der Eindringwiderstand der Sonde,
- A_S die Stirnfläche des Pfahles bzw. die Sondenquerschnittsfläche,
- λ_t Tragfähigkeitsbeiwert,
- ν_t Formbeiwert.

Die Größen λ_t und ν_t sind Funktionen des inneren Reibungswinkels φ des Schüttgutes (s. [1] oder [3]). (Auf die Problematik, die sich aus dieser Abhängigkeit ergeben kann, wird in [4] ausführlich eingegangen.)

2.4 Versuchstechnische Einflußfaktoren

Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen mit der Spitzendruck-Meßsonde war es, insbesondere versuchstechnisch und baulich bedingte Größen der Sonde bei der Messung des Eindringwiderstandes mathematisch zu erfassen. Dabei mußten alle Abweichungen berücksichtigt werden, die sich zwangsläufig zwischen einer theoretischen Betrachtung nach Abschn. 2.2 und 2.3 und dem praktischen Einsatz einer geeigneten Meßsonde ergeben. Um diese Einflußfaktoren einfach überschauen zu können, wird Gl. (1) durch mehrere sondenspezifische Faktoren f ergänzt, die die folgenden Parameter berücksichtigen:

- f_β die Sondierrichtung β gegenüber der Lotrechten,
- f_d den Sonden- bzw. Spitzendurchmesser d ,
- f_a den Kegelspitzenwinkel a und dessen Oberflächenrauigkeit,
- f_v die Sondiergeschwindigkeit v ,
- f_K als Korrekturfaktor.

Der Faktor f_K beinhaltet eine einmalige Korrektur, um die Annahmen des theoretischen Ansatzes mit den tatsächlichen Eigenschaften des Schüttgutes und den gewählten Abmessungen der Sonde in Einklang zu bringen. Damit läßt sich die gesuchte vertikale Druckspannung σ_v im Schüttgut ermitteln zu

$$\sigma_v = \frac{F_S}{A_S} \frac{1}{\lambda_t \nu_t} f_\beta f_d f_a f_v f_K \quad (2)$$

Alle Einzelfaktoren f werden im folgenden zunächst getrennt untersucht, um abschließend je nach eingesetzter Meßsonde durchaus wieder – zusammen mit der konstanten Querschnittsfläche A_S – zu einem einzigen Sondenfaktor f_S zusammengefaßt zu werden:

$$f_S = (f_\beta f_d f_a f_v f_K) / A_S \quad (3)$$

Damit wird

$$\sigma_v = \frac{F_S f_S}{\lambda_t \nu_t} \quad (4)$$

Bauliche Abweichungen bei späteren Sonden gegenüber der hier eingesetzten Meßsonde können anhand dieser Unterlagen also leicht durch entsprechende Korrekturfaktoren bei der Auswertung der Meßergebnisse berücksichtigt werden.

3. Versuchsaufbau

Der Aufbau der verwendeten Sondiereinrichtung sowie der gesamte Versuchsstand sind in [1] und [2] beschrieben. Daher soll an dieser Stelle im wesentlichen nur auf Ergänzungen eingegangen werden. (Eine ausführliche Darstellung findet sich auch in [3].)

3.1 Aufbau der Spitzendrucksonde

Bild 1 zeigt noch einmal den Sondenkörper. Auf das Ende des Sondenrohres d ist ein Anschlußstück c mit einem eingebauten piezoelektrischen Kraftaufnehmer b aufgesetzt, auf den wiederum die Kegelspitze a aufgeschraubt ist. Beim Einfahren der Sonde in das Schüttgut kann so der Eindringwiderstand (über die nicht eingezeichnete elektrische Leitung) direkt gemessen werden.

Der relativ einfache Aufbau des eigentlichen Sondenkörpers macht es möglich, einerseits verschiedene Kegelwinkel zu untersuchen, andererseits auch den Kegeldurchmesser zu verändern. Das Verbindungsstück mit mindestens etwa 10fachem Durchmesser als Länge hat jeweils den gleichen Durchmesser wie der Kegel, so daß sich kein Hohlraum bzw. aufgelockerter Schüttgutbereich direkt hinter dem Meßkegel ausbilden kann, der eventuell zu einem Abfall des zu messenden Eindringwiderstandes führt (s. Abschn. 4.2).

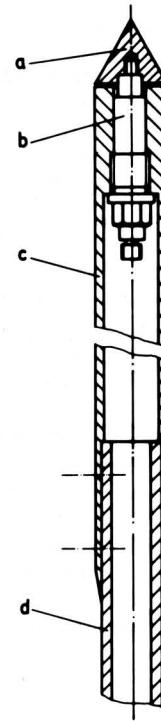


Bild 1. Aufbau der Spitzendruck-Meßsonde. (Durchmesser 24 mm, Spitzenwinkel $a = 60^\circ$).

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| a Sondenspitze | c Anschlußstück |
| b piezoelektr. Kraftaufnehmer | d Sondenrohr |

Die Untersuchung der anderen in Abschn. 2.4 beschriebenen versuchstechnischen Einflußfaktoren war ebenfalls durch geringe bauliche Veränderungen der Sondiereinrichtung möglich. So konnten u.a. verschiedene Sondenvorschubgeschwindigkeiten zwischen 0,21 und 31,5 cm/s durch den Einsatz verschiedener Getriebe erreicht werden. Bei allen anderen Untersuchungen betrug die Sondiergeschwindigkeit einheitlich 1 cm/s.

Auch der Einfluß der Sondierrichtung gegenüber der Vertikalen konnte mit einer entsprechenden Versuchseinrichtung untersucht werden, mit der ein markanter Punkt im Silo unter verschiedenen Winkeln gegenüber der Vertikalen angefahren wurde. Über entsprechende Bohrungen in Wand und Boden des Behälters wurde dieser Punkt, der 30 cm oberhalb des Silobodens in der Siloachse lag, jeweils in Winkelsprüngen von 15° gegenüber der Vertikalen von der Sonde durchstoßen.

3.2 Aufbau des Versuchsstandes

Für die experimentellen Untersuchungen wurden je nach gewähltem Sondenradius zur Vermeidung der Umwälzung unnötig großer Schüttgutmengen wahlweise zwei zylindrische Modellsilos mit ebenem Boden eingesetzt:

Modellsilo I: Innendurchmesser 600 mm und Höhe 1200 mm sowie

Modellsilo II: Innendurchmesser 1000 mm und Höhe 2100 mm.

Beide Behälter waren aus Stahl und hatten eine Wandstärke von 10 mm, um alle störenden Einflüsse durch ein elastisches Nachgeben der Wand auszuschalten, die den Spannungszustand im lagernden Haufwerk beeinflussen, s. Anhang in [3].

Durch eine entsprechende Belastungseinrichtung konnten in dem Modellsilo II außerdem Druckspannungen simuliert werden, wie sie in einem Großsilo auftreten. Eine Beschreibung dieses erweiterten Versuchsstandes ist außer in den o.g. Schrifttumangaben in [11] zu finden.

4. Experimentelle Ergebnisse

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden — wie einleitend erwähnt — im Hinblick auf eine Weiterentwicklung der Spitzendruck-Meßsonde durchgeführt, um dabei insbesondere die folgenden Einflüsse auf den Eindringwiderstand zu klären:

1. Abmessungen des Modellsilos und Aufbau des Versuchstandes,
2. Anordnung, Bauart und Ausführung der Sonde,
3. Schüttguteinflüsse.

Dabei standen vor allem die richtige Interpretation der Meßwerte sowie eine optimale praxisgerechte Bauform der Sondiereinrichtung im Vordergrund.

4.1 Einflußbereich vor und neben der Sonde

Es ist zweckmäßig, die Meßflächen von Druckspannungs-Meßeinrichtungen für Schüttgüter im Vergleich zur Korngröße nicht zu klein zu wählen, um die Meßwertschwankungen so gering wie möglich zu halten [11]. Diese Überlegungen gelten ebenso für den Sondendurchmesser im Hinblick auf den Eindringwiderstand der Sonde. Dem steht jedoch entgegen, daß der Sondendurchmesser aufgrund der begrenzten Abmessungen eines Modellsilos möglichst klein gehalten werden sollte, um eine eventuelle Beeinflussung der Sondierergergebnisse durch die Behälterwand auf jeden Fall zu vermeiden.

Beim Einfahren der Sonde in das Haufwerk verdrängt sie das ihrem Volumen entsprechende Gutvolumen (s. Abschn. 2.1). Dabei entstehen vor und neben der Sondenspitze plastische Verformungen, an die sich ein Bereich mit vorwiegend elastischen Verformungen anschließt. Der plastische Verformungsbereich muß natürlich kleiner sein als die Behälterabmessungen, da sonst die Behälterwände die Verdrängung der Körner behindern würden, so daß fehlerhafte Sondenmessungen entstünden. Daher wurde zunächst experimentell ermittelt, wie groß der Verformungsbereich der Körner um die Sondenspitze herum ist.

Bild 2 zeigt einen Original-Meßschrieb für horizontales Sondieren in 50 cm Höhe über dem Siloboden, wobei der Sondeneindringwiderstand auf der Ordinate in Abhängigkeit von der jeweiligen Sondeneindringtiefe aufgetragen ist. In diesem Fall sind zwei gleichartige Versuche übereinander aufgetragen, woraus gleichzeitig die sehr gute Reproduzierbarkeit der Meßwerte hervorgeht. Für die weitere Auswertung wurde stets der hier nachträglich gestrichelt eingezeichnete mittlere Kurvenverlauf des gesamten Streubandes ermittelt und benutzt.

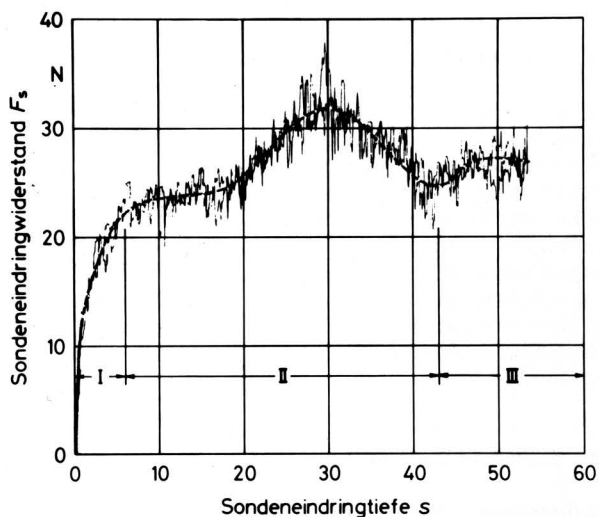


Bild 2. Verlauf des Sondeneindringwiderstandes bei horizontalem Sondieren, Zentrische Befüllung, Gutart: Sojabohnen, Modellsilo I, Sondendurchmesser: 24 mm.

Wie Bild 2 zeigt, kann der gesamte Meßschrieb in die folgenden drei Teilbereiche aufgeteilt werden:

Bereich I:

Beim Eindringen der Sonde muß sich das Gut um die Sondenspitze herum zunächst so lange verdichten, bis sich ein gewisser Gegendruck aufgebaut hat, der ein plastisches Fließen des Gutes zur Folge hat.

Bereich II:

Hier verläuft die Kurve zunächst annähernd horizontal und steigt dann an, wobei der Eindringwiderstand nach 30 cm Gesamtsondierweg ein Maximum erreicht. Dieser Wert wird genau in der Siloachse registriert, wo auch die größte örtliche Schüttdichte ermittelt werden konnte. Da der gemessene Eindringwiderstand von der jeweiligen Spannung im Gut abhängig ist, darüber hinaus aber auch stark von der örtlichen Schüttdichte beeinflusst wird (s. Abschn. 2.1), ist damit auch nachgewiesen, daß der gemessene Eindringwiderstand genau der jeweiligen Stellung der Sondenspitze zuzuordnen ist, d.h. daß kein sog. Vorlauf auftritt — eine Überlegung, die vor allem im Modellsilo mit großem Druckspannungsgefälle zu berücksichtigen wäre. Für den Bereich II ergibt sich bei dem hier dargestellten horizontalen Sondieren ein teilweise symmetrischer Kurvenverlauf.

Bereich III:

Hier macht sich bereits die Auswirkung der festen Silowand auf den Eindringwiderstand bemerkbar, so daß mit zu hohen Meßwerten zu rechnen ist. Für die weitere Auswertung der Sondierschriebe müssen demnach der Druckaufbaubereich I, dessen Länge etwa dem 2,5fachen Sondendurchmesser entspricht, und der Wandeinflußbereich III mit einer Länge von etwa 7,5fachen Sondendurchmesser außer acht gelassen werden. Die angegebenen Zahlenwerte stellen den ungünstigsten Fall für einen Silo ohne Zusatzbelastung dar; bei größerer Belastung mit aufgebrachtem Luftdruck und größerer mittlerer Schüttdichte werden beide Bereiche noch erheblich kleiner, so daß die obigen Zahlenangaben auf jeden Fall zu einem richtigen Auswertebereich II führen.

Mit einer Versuchsanstellung, wie sie in Bild 3 rechts angedeutet ist, wurde der Einflußbereich der Sonde, in dem noch eine Verschiebung der Körner auftritt, vor und neben der Sonde untersucht. Nach niveaugleichem Füllen des Silos II bis zur späteren Sondierhöhe von 50 cm wurde dort an der zwischenzeitlichen Gutoberfläche ein Meßteller (150 x 150 mm, 2 mm dick) in der dargestellten Weise eingelegt. Danach wurde der Modellsilo vollgefüllt. Solange sich der Teller im Einflußbereich der Sonde befindet, wird er beim Einfahren der Sonde um einen Weg Δa bzw. Δr nach außen verschoben. Beide Verschiebungen wurden in getrennten Versuchen ermittelt. Die über eine 2 mm dicke Verbindungsstange von einem außerhalb des Silos angebrachten induktiven Wegaufnehmer ermittelte axiale Verschiebung Δa wurde mit Hilfe eines X,Y-Schreibers direkt in Abhängigkeit vom Abstand a aufgetragen, wobei eine Auflösung der Verschiebung von bis zu 1/1000 mm möglich war. Für die Ermittlung der radialen Verschiebung Δr mußte dagegen der Meßteller in verschiedenen Abständen von der späteren Sondierachse eingelegt werden; es wurde jeweils das maximale Zurückweichen des Meßtellers beim Vorbeifahren der Sonde ermittelt und als Meßpunkt in Bild 3 eingetragen. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß bereits bei einem Abstand von 32 cm vor der Sondenspitze (entspricht etwa dem 13fachen Sondendurchmesser) ein erstes Zurückweichen Δa des Meßtellers auftritt und daß dieser Vorgang sich beim weiteren Herannahen der Sonde zunehmend verstärkt. Die Meßwerte der radialen Verschiebung Δr zeigen, daß diese mit 26 cm (entspricht etwa dem 11fachen Sondendurchmesser, d.h. der gesamte seitliche Verformungsbereich der Körner entspricht etwa dem 22fachen Sondendurchmesser) etwas kleiner ist. (Nimmt man zum Vergleich ein theoretisch inkompressibles Haufwerk an, d.h. ein Schüttgut, das auch nach dem Eindringen der Sonde sein Hohlraumvolumen beibehält, so kann über eine Volumenbetrachtung des von der Sonde radial verdrängten Gutes leicht rechnerisch nachgewiesen werden, daß es auch bei sehr großen Abständen zur Sondierachse noch zu einem spürbaren Zurückweichen der Körner kommt: z.B. würden sich die Körner bei einem Silo-

durchmesser von 1 m dort noch um etwa 0,3 mm verschieben wollen, so daß eine Darstellung dieser theoretischen Überlegung in Diagrammform weit außerhalb des in Bild 3 betrachteten Bereiches liegen würde.)

Diese experimentellen Untersuchungen wurden mit einem relativ kleinen Sondendurchmesser von 24 mm und einem großen Silodurchmesser von 1 m durchgeführt, um das Zurückweichen des Meßtellers in einem großen Bereich und darüber hinaus in einem möglichst großen Wandabstand untersuchen zu können; dadurch war sichergestellt, daß sich die zwischen Wand und Teller befindlichen Körner nicht verkeilen können. Unter der Voraussetzung einer geometrischen Ähnlichkeit von Sonde und Verformungsbereich des Schüttgutes bei Sonden mit unterschiedlichen Durchmessern wäre daher für den Einsatz der später verwendeten 3-Komponenten-Meßsonde (Durchmesser 36 mm) ein radialer Verformungsbereich mit einem Durchmesser von 78 cm erforderlich, der damit kleiner ist als der tatsächlich verwendete Silodurchmesser von 1 m. Der axiale Verformungsbereich vor der Sonde errechnet sich analog dazu zu 48 cm.

Abschließend kann gesagt werden, daß beim Sondiervorgang aufgrund einer Kraftübertragung von Korn zu Korn zwar ein sehr großer Ausstrahlungsbereich der Sonde zu beobachten ist – dieser elastische Bereich ist größer als der oben beschriebene plastische Verformungsbereich [3] –, daß aber eine feste Begrenzung, d.h. Silowand innerhalb dieses Bereiches, an der auch eine Spannungsänderung feststellbar wäre, keinen Einfluß auf den gemessenen Eindringwiderstand hat, solange deren Durchmesser nicht den 22fachen Sondendurchmesser unterschreitet. Da diese Untersuchungen für die größte im Versuch zu erzielende mittlere Schüttdichte von 805 kg/m³ durchgeführt wurden, dürfte der obige Wert bei lockereren Schüttungen erst recht gelten.

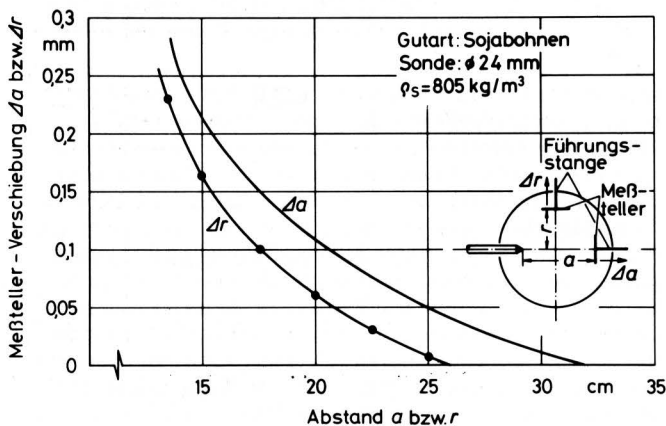


Bild 3. Axiale und radiale Verschiebung Δa und Δr zweier im Silo eingelegerter Meßteller in Abhängigkeit vom Abstand a bzw. r zur Sondenspitze, horizontales Sondieren.

4.2 Einfluß der Sondenkörperlänge

Der erste praktische Einsatz einer Meßsonde im Großsilo [2, 12] hat gezeigt, daß die vom Sondenantrieb neben dem relativ geringen Eindringwiderstand zusätzlich zu überwindenden Reibkräfte zwischen Sondenrohr und Schüttgut je nach Silotiefe, Schüttdichte und Gutart Werte von 10 kN überschreiten können. Zur Vermeidung unnötig großer Antriebskräfte ist es daher sinnvoll, eine Art "Maulwurfseffekt" zu erzeugen, d.h. den Durchmesser des sich an den Sondenkörper anschließenden Sondenrohres kleiner zu gestalten als den Schaftdurchmesser der eigentlichen Sonde. Dabei ist aber zu beachten, daß die Sondenschaftlänge größer gewählt wird als die Länge des sich um die Sondenspitze herum aufbauenden Druckbereiches, d.h. des dort sich bildenden Fließ- und Einflußbereiches, um den Eindringwiderstands-Meßwert nicht zu verfälschen.

Für die systematische Untersuchung der erforderlichen Mindestlänge des dickeren Sondenschaftes wurde eine Sonde mit dem extrem großen Sondendurchmesser von 44 mm mit variabler Sondenschaftlänge l_s gewählt; der Sondenschaft hatte 15 mm Durchmesser. Die bei einer großen Schüttdichte (ungünstigster Fall) für die unterschiedlichen Schaftlängen ermittelten Meßschriebe sind in Bild 4 zusammengefaßt. Alle eingezeichneten Kurven steigen beim Eindringen der Sonde in das Schüttgut gemäß dem in Abschn. 4.1 erläuterten Druckaufbaubereich zunächst an. Sobald das Ende des Sondenschaftes den Behälterboden passiert hat und in das Gut gelangt ist, nimmt der Eindringwiderstand nicht mehr zu, wie eigentlich zu erwarten wäre. Zu bemerken ist, daß durch eine mit der Reduzierstelle mitgeführte Abdichtung gewährleistet war, daß kein Gut neben dem Sondenrohr aus dem Behälter herausrieseln konnte. Die Kurven lassen erkennen, daß in diesem Fall erst bei einer Schaftlänge von 400 mm an eine Meßwertverfälschung vermieden wird. Dies bedeutet, daß der Sondenschaft bei zukünftigen Untersuchungen eine Mindestlänge von etwa dem 10fachen des Sondendurchmessers haben sollte. (Bei den Untersuchungen am Modellsilo wurde im weiteren aus konstruktiven Gründen der Sondendurchmesser über der ganzen Baulänge konstant gehalten.)

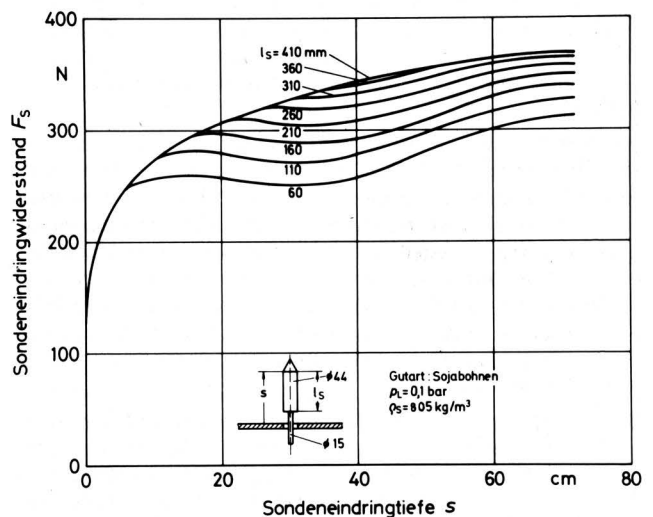


Bild 4. Sondeneindringwiderstand F_S in Abhängigkeit von der Sondeneindringtiefe s bei verschiedenen Sondenkörperlängen l_s (p_L = Luftdruck der Belastungseinrichtung).

4.3 Einfluß der Sondenkörperrauigkeit

In einer separaten Versuchsreihe wurde der Einfluß der Oberflächenrauigkeit des Sondenschaftes auf den gemessenen Eindringwiderstand der Sondenspitze untersucht. Dazu wurde der Schaft in einer Länge von 50 cm einerseits mit sehr rauhem Schmirgelleinen der Körnung 60 und andererseits mit Teflon als sehr glattem Belag beklebt. Die Versuche ergaben, daß zwar die Reibung zwischen Gut und Schaft sehr unterschiedlich ist, daß aber keine Rückwirkung auf die Spitze zu verzeichnen ist, die außerhalb der allgemeinen Meßwertstreuung liegt. Damit konnte nachgewiesen werden, daß die Sondenkörperrauigkeit keinen Einfluß auf den gemessenen Eindringwiderstand hat.

4.4 Einfluß der Sondierrichtung

Die theoretischen Betrachtungen nach Abschn. 2.2 setzen eine vertikale Sondierrichtung voraus, wobei die Sonde von oben in das Schüttgut eindringt. Bei der Sondierung am Großsilo [2, 12] hat es sich aber als zweckmäßig erwiesen, den Silo von unten nach oben zu durchfahren, um auf diese Weise die großen Sondier-Reaktions-

kräfte direkt in das Fundament des Gebäudes, statt beim Sondieren von oben nach unten in die Silodecke, einleiten zu können. Auch am Modellsilo ist ein Sondieren von unten nach oben besonders vorteilhaft, da die in diesem Falle unter dem Silo installierte Sondiereinrichtung weder beim Befüllen noch beim zusätzlichen Belasten der Gutoberfläche im Wege ist. Außer dieser Richtungs-umkehr tritt im Silo eine weitere Abweichung von der erwähnten Theorie auf: Im Gegensatz zum unendlichen Halbraum, wo die maximalen Hauptspannungen stets vertikal und damit in Sondier-richtung verlaufen (s. Anhang in [3]), fallen sie allgemein bei einer Sondierung außerhalb der Siloachse nicht mehr mit der Sondier-richtung zusammen.

Aufgrund dieser Überlegung wurde in einer weiteren Versuchsreihe untersucht, welchen Einfluß eine Abweichung der Sondierrichtung von der Hauptspannungsrichtung auf den Eindringwiderstand der Sonde hat. Mit der in Bild 5 skizzierten Versuchsanordnung war es möglich, über entsprechende Bohrungen in Wand und Boden des Modellsilos I einen markanten Punkt auf der Siloachse im Abstand von 30 cm oberhalb des Silobodens aus unterschiedlichen Richtungen, d.h. unter verschiedenen Winkeln β gegenüber der Vertikalen und damit in diesem Fall gegenüber der Hauptspannungsrichtung anzufahren. Die im Abstand von 15° von oben beginnend in diesem Punkt jeweils gemessenen Eindringwiderstände wurden miteinander verglichen. Die Untersuchung wurde sowohl im Modellsilo-Spannungsbereich (unterhalb von 10 kPa), d.h. ohne Zusatzlast ($p_L = 0$), als auch für simulierte Großsilodrücke (bis 100 kPa) durchgeführt. Weitere Parameter waren der Spitzenwinkel des Meßkegels, dessen Rauigkeit und Durchmesser sowie die Gutart und die mittlere Schüttdichte ρ_S .

In Bild 5a und b ist das Ergebnis dieser Versuchsreihe am Beispiel von Sojabohnen für beide Druckspannungsbereiche in Form eines Polardiagramms dargestellt. Der Strahlenwinkel β entspricht der jeweiligen Sondierrichtung gegenüber der Vertikalen; die gemessenen Eindringwiderstände sind als Strecken auf den Polstrahlen angetragen. Anhand der eingezeichneten Kurven ergibt diese Darstellungsweise einen guten Überblick über den Einfluß der Sondierrichtung: Ausgehend von 0° wird unter sonst gleichen Bedingungen bei geringen Druckspannungen (Modellsilo, Bild 5a) unter einem Winkel von etwa 45° gegenüber der Lotrechten der größte Eindringwiderstand erreicht, der geringste Wert tritt bei einer Sondierung von unten auf. Dieses Bild wiederholt sich stets bei allen oben aufgezählten Parametern im Modellsilobereich, so auch bei den beiden hier dargestellten unterschiedlichen mittleren Schüttdichten. Daher ist es möglich, alle weiteren Parameter durch Einführung zusätzlicher Faktoren (s. Abschn. 2.4) relativ einfach zu erfassen.

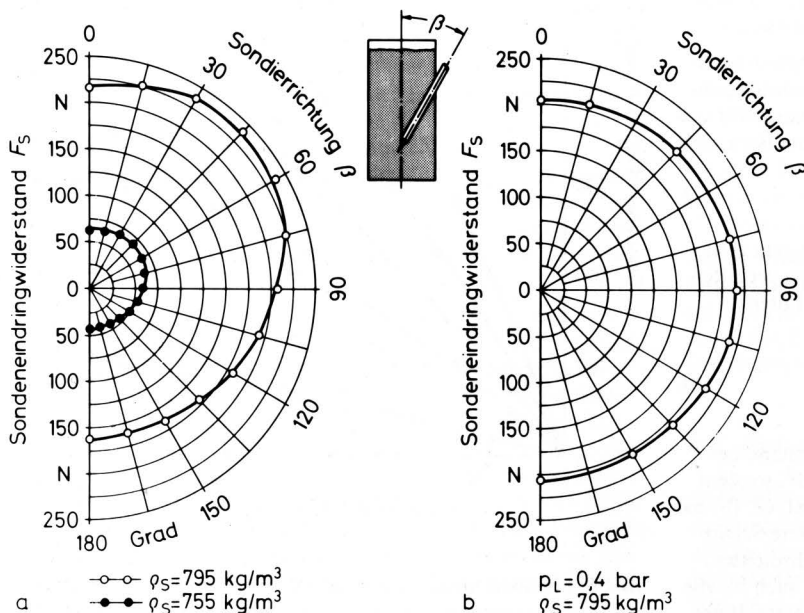


Bild 6. Einflußfaktor f_β als Funktion der Sondierrichtung β für den Modellsilo-Druckspannungsbereich.

Für den Kurvenverlauf in Bild 5a, d.h. den Einfluß der Sondierrichtung auf den gemessenen Eindringwiderstand konnte bisher keine eindeutige Erklärung gefunden werden; eine genauere und zeitraubende Untersuchung schien nicht sinnvoll, da diese Erscheinung für den für das neue Meßverfahren interessanteren Spannungsbereich des Großsilos nicht auftritt: Die in Bild 5b verbundenen Meßwerte liegen zwar erwartungsgemäß im Betrag entsprechend höher, aber annähernd auf einem konzentrischen Kreis, d.h. im Großsilo wird kein zu berücksichtigender Einfluß der Sondierrichtung gegenüber der örtlichen maximalen Hauptspannungsrichtung auftreten. Der Einfluß der Sondierrichtung für den Modellsilo kann anhand von Bild 5a durch einen Faktor f_β erfaßt werden, der durch den Quotienten aus dem für die Anwendung der Theorie ausschlaggebenden Eindringwiderstand $F_{S,0^\circ}$ (vertikal von oben gemessen) und dem im Versuch unter einem beliebigen Winkel β gemessenen Eindringwiderstand $F_{S,\beta}$ gebildet wird:

$$f_\beta = F_{S,0^\circ} / F_{S,\beta} \quad (5)$$

Die sich daraus ergebende Abhängigkeit des Faktors f_β vom Sondierwinkel β ist in Bild 6 dargestellt, das als Arbeitsdiagramm bei späteren Modellsilo-Versuchen mit Spannungen unterhalb von 10 kPa für Gl. (2) verwendet werden kann. Für Druckspannungen oberhalb etwa 20 kPa, d.h. für den gesamten Großsilo gilt entsprechend

$$f_\beta \approx 1 \quad (6)$$

Für den dazwischen liegenden und in der Praxis weniger interessanten Spannungsbereich ist entsprechend zu interpolieren.

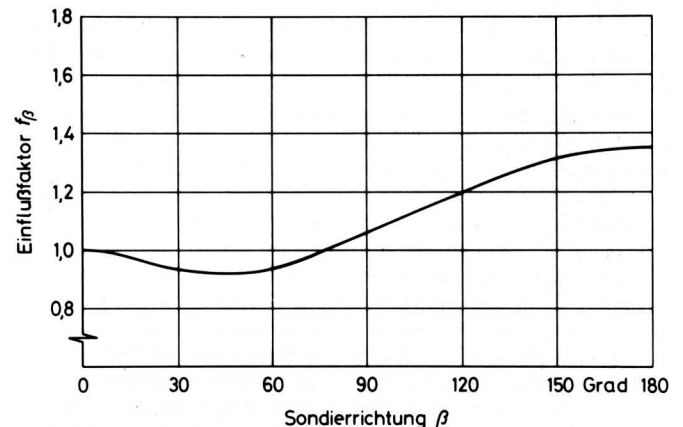


Bild 5. Sondeneindringwiderstand F_S in Abhängigkeit von der Sondierrichtung β , Gutart: Sojabohnen, Spitzenwinkel: 60° , Sonden-durchmesser: 24 mm.

a Modellsilo-Druckspannungsbereich
b Großsilo-Druckspannungsbereich

4.5 Einfluß des Spitzendurchmessers

In Abschn. 2.3 wurde festgestellt, daß der Eindringwiderstand proportional der Querschnittsfläche, d.h. bei einem rotationssymmetrischen Körper proportional dem Quadrat des Durchmessers ist. Aus zahlreichen bodenmechanischen Untersuchungen ist aber bekannt, daß der spezifische Eindringwiderstand (bezogen auf die jeweilige Querschnittsfläche) einer im Erdreich eingesetzten Spitzendrucksonde bzw. eines dort eingetriebenen dünnen Pfahles wesentlich größer ist als die eines dicken Pfahles unter sonst gleichen Bedingungen, z.B. [7]. Eine erschöpfende Erklärung dazu gibt es bislang nicht. Höchstwahrscheinlich ist diese Erscheinung darauf zurückzuführen, daß sich bei einem dünnen Pfahl bzw. einer Sonde das Material um die Spitze herum aufgrund des elastisch-plastischen Fließens relativ gleichmäßig verdichtet, so daß überall gleichzeitig die maximal übertragbare Schubspannung erreicht wird, die dann auch einen relativ gleichmäßigen Bruch zur Folge hat; danach wird sich der Vorgang wiederholen. Bei einem dicken Pfahl mit einem entsprechend großen Verdrängungs- bzw. Verformungsvolumen der Körner wird nicht überall gleichzeitig die maximale Schubspannung erreicht und überschritten, vielmehr treten dort aus energetischen Gründen nur örtliche Bruchzustände nacheinander auf, so daß der spezifische Eindringwiderstand im Verhältnis niedriger liegt.

Diese Überlegung wird durch die eigenen Untersuchungen mit der Spitzenkraft-Meßsonde bei Schüttgütern bestätigt: Vergleicht man die Meßschriebe von einem kleinen und einem großen Sondendurchmesser zunächst rein qualitativ, so fallen sofort die großen Meßwertschwankungen bzw. die sich ständig wiederholenden Spannungsspitzen bei der kleinen Sonde auf; die große Sonde führt dagegen zu einem wesentlich ausgeglicheneren Kurvenverlauf mit einfach zu bestimmendem Mittelwert (Bild 2). Darüber hinaus macht sich auch hier der bereits angesprochene quantitative Unterschied zwischen einem auf einen großen und einem auf einen kleinen Sondenquerschnitt bezogenen Eindringwiderstand bemerkbar.

Im Rahmen der Untersuchung des Durchmesser-Einflusses auf den Eindringwiderstand wurden Meßkegel mit 12, 24, 30, 36 und 44 mm Durchmesser eingesetzt unter Berücksichtigung der Parameter Druckspannung, Schüttdichte und Gutart. Durch eine unterschiedliche Kombination dieser Einflußgrößen konnte nochmals bestätigt werden, daß eine Aufteilung der bereits früher angesprochenen baulich und versuchstechnisch bedingten Abweichungen von der Theorie in Form von Einzeluntersuchungen möglich ist. Um dabei die Auswertung der Versuche unter sonst gleichen Bedingungen vornehmen zu können, wurden jeweils die Meßwerte von markanten Punkten auf der Siloachse (z.B. $z = 50$ cm) miteinander verglichen. (Zum Vergleich wurde darüber hinaus in gleichartigen Versuchen dort die vertikale Druckspannung σ_v mit eingelegten Druckspannungsmessdosen nach [11] direkt gemessen.)

In Bild 7 ist beispielhaft die Abhängigkeit des Eindringwiderstandes vom Sondendurchmesser für unterschiedliche Druckspannungen dargestellt. Jeweils für eine konstante Druckspannung läßt sich diese Abhängigkeit auch durch die empirisch gefundene Beziehung

$$F_S \sim d^{1,7} \quad (7)$$

erfassen; oder in anderer Form dargestellt: Vergleicht man zwei verschiedene Sondendurchmesser d (Index 1 und 2), so verhalten sich deren Eindringwiderstände F_S entsprechend der Potenzfunktion

$$\frac{F_{S,1}}{F_{S,2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1,7} \quad (8)$$

Damit wird nochmals deutlich, daß der Eindringwiderstand bei Verwendung eines größeren Durchmessers nicht mit d^2 , sondern weniger als proportional zur Querschnittsfläche wächst. Gl. (8) hat nicht nur Gültigkeit für die in Bild 7 dargestellte mittlere Schüttdichte von Sojabohnen, sondern auch für andere Schüttdichten. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, daß sie auch für alle untersuchten landwirtschaftlichen Schüttgüter, wie Gerste, Hafer,

Roggen, Weizen und Sojaschrot, verwendet werden darf, ohne daß der mittlere meßbare Fehler größer als 5 % wird.

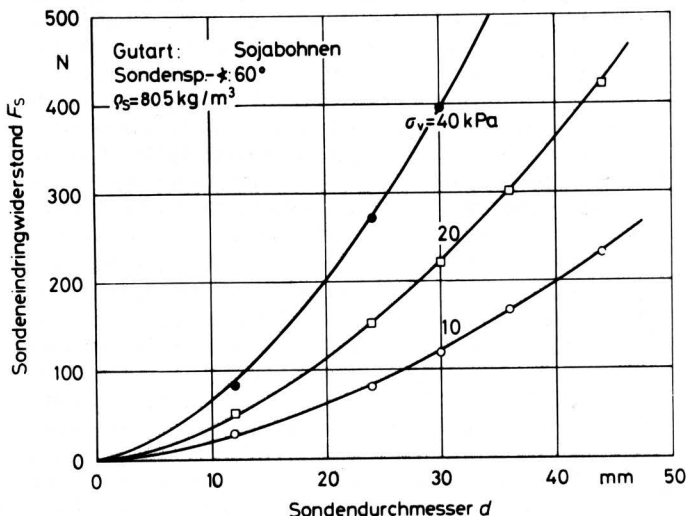


Bild 7. Sondeneindringwiderstand F_S in Abhängigkeit vom Sondendurchmesser d für verschiedene Druckspannungen σ_v .

In Bild 8 wurde eine andere Darstellungsweise gewählt: Aus einer Vielzahl von Versuchen ist der örtliche Sondeneindringwiderstand in Abhängigkeit von der mit einer eingelegten Meßdose nach [11] ermittelten vertikalen Druckspannung aufgetragen mit dem Sondenspitzenradius als Parameter. Greift man aus den Kurven, die die einzelnen Meßwerte miteinander verbindet, die Eindringwiderstandswerte F_S für zwei verschiedene Durchmesser d bei einer beliebigen Druckspannung heraus, so genügen sie wieder Gl. (8). Darüber hinaus geht aus dieser Darstellung besonders klar hervor, daß der Eindringwiderstand nicht gleichmäßig – entsprechend der Theorie nach Abschn. 2.3 speziell Gl. (1) –, sondern weniger stark mit steigender Druckspannung im Gut zunimmt [2, 3].

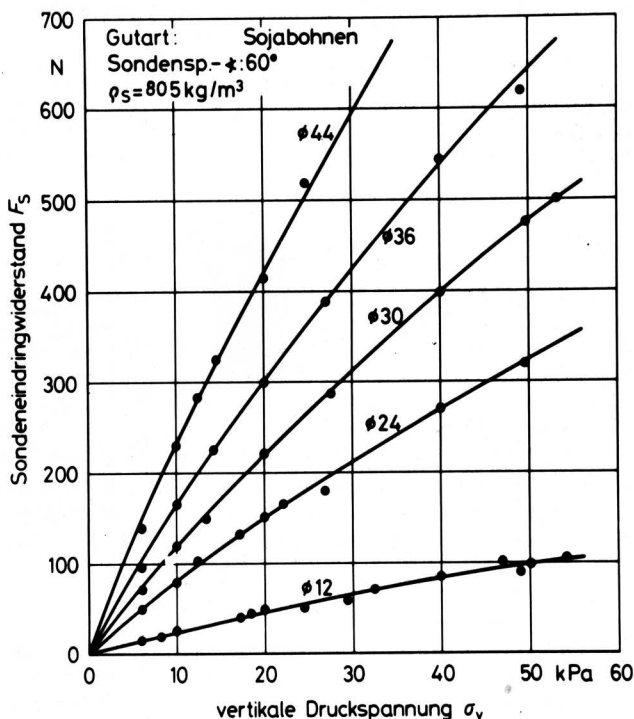


Bild 8. Sondeneindringwiderstand F_S in Abhängigkeit von der vertikalen Druckspannung σ_v für verschiedene Sondendurchmesser d .

Aufgrund der relativ einfachen Beziehung Gl. (8) kann die theoretisch begründete Gl. (1) in der erweiterten Form Gl. (2) für beliebige Durchmesser verwendet werden. Dabei wurde der in **Bild 9** in Abhängigkeit vom jeweiligen Sondenspitzenradius dargestellte Korrekturfaktor f_d willkürlich für einen Durchmesser von 36 mm auf den Wert 1 festgelegt; später wird dann ein genauer Abgleich der mit der Sonde ermittelten und der mit der Meßdose gemessenen Druckspannungen hergestellt werden (s. [4]). Dieser Sondendurchmesser von 36 mm (mit einer Querschnittsfläche A_S von etwa 10 cm^2) wurde bei den späteren Untersuchungen mit der 3-Komponenten-Meßsonde [4] gewählt, weil er ebenfalls bei bodenmechanischen Spitzendrucksonden vorwiegend zum Einsatz kommt [5].

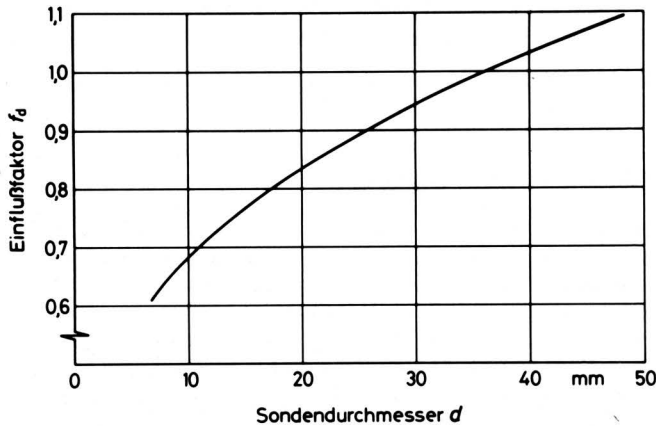


Bild 9. Korrekturfaktor f_d als Funktion des Sondendurchmessers d .

4.6 Einfluß des Kegelwinkels und der Oberflächenrauigkeit der Sondenspitze

Der einfache Aufbau der Spitzendruck-Meßsonde nach Bild 1 erlaubt es, durch Aufschrauben verschiedener Sondenspitzen den Einfluß des Kegelspitzenwinkels auf den Eindringwiderstand zu untersuchen. Es wurden 7 Kegel eingesetzt, deren Spitzenwinkel mit Stufensprüngen von 30° zwischen 15° bzw. 30° und 180° lagen. Gleichzeitig wurde der Einfluß der Oberflächenrauigkeit der Kegelspitze untersucht; außer der auch in der Bodenmechanik üblicherweise eingesetzten, glattgedrehten bzw. feingeschlichteten Stahlausführung wurden die Kegel mit rauhem Schmirgelleinen der Körnung 60 beklebt, dessen äußerer Reibungswinkel etwa dem inneren Reibungswinkel des Schüttgutes entspricht [3], und auch teilweise mit Teflon, um eine sehr glatte Oberfläche entsprechend der theoretischen Ableitung in Abschn. 2.2 zu berücksichtigen. Bei dieser Versuchsreihe wurden die Parameter Druckspannung, Gutart und Schüttdichte sowie Sondierrichtung, Sondendurchmesser und Oberflächenrauigkeit der Sondenspitze variiert. Die Auswertung der Meßschriebe erfolgte wie oben an markanten Stellen auf der Siloachse. Spitzenwinkel und Oberflächenrauigkeit konnten hier nur gemeinsam erfaßt werden.

Ein qualitativer Vergleich zweier Meßschriebe mit kleinem und großem Spitzenwinkel unter sonst gleichen Versuchsbedingungen zeigt unterschiedliche Amplitudenausschläge, wobei ein großer Spitzenwinkel auch die größeren Schwankungen aufweist. Einerseits ist in diesem Fall die Oberfläche des Kegels kleiner, so daß eine kleinere Anzahl von Körnern direkt auf die Spitze wirkt (vgl. auch Abschn. 4.5) und so größere Meßwertschwankungen hervorruft, andererseits wird das Korngefüge durch den stumpfen Kegel weniger gut geteilt, so daß sich ständig ein neuer Druck-Dichte-Bereich vor der Spitze aufbaut, durch den die Sonde jedesmal "hindurchplatzt"; eine schlanke Sonde zerteilt das Korngefüge besser und gleitet somit gleichmäßiger durch das Gut.

Die Versuchsergebnisse sind in **Bild 10** dargestellt. Für die ebene Platte (180° -Kegel) sind die Eindringwiderstandswerte von Stahl und Teflon nahezu gleich groß, für Schmirgelleinen liegen sie dagegen geringfügig tiefer. Unter Benutzung des Grundgedankens der Gleitflächentheorie (s. Abschn. 2.2) ist diese Erscheinung darauf zurückzuführen, daß sich je nach Oberflächenrauigkeit des ebenen Fundamentes bzw. der ebenen Stirnfläche der Sonde unterschiedlich steile künstliche Gutkegel ausbilden und sich so beim Sondieren vor der Sonde herschieben [3]. Dieser unterschiedliche Gutkegelaufbau in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Stirnfläche konnte ebenfalls bei Vorversuchen beim Einfahren eines dicken Stabes mit rechteckigem Querschnitt in eine Sojabohnen-Schüttung hinter einer Glasplatte durch Beobachtung bestätigt werden. Die kleinere Kegelhöhe bei einer rauhen Stirnfläche bewirkt nun, daß die seitlichen Gleitflächen weniger weit nach vorne und auch zur Seite reichen, bevor sie auf die Ersatzoberfläche in Höhe der Kegelgrundfläche stoßen, so daß dabei ein etwas geringeres Körnervolumen an der Verformung beteiligt ist.

Sehr stumpfe Kegel mit einem Spitzenwinkel von mehr als 120° führen jeweils etwa zu dem gleichen Eindringwiderstand; bei schlankeren Stahlkegeln macht sich zunehmend die günstigere Keilwirkung bemerkbar.

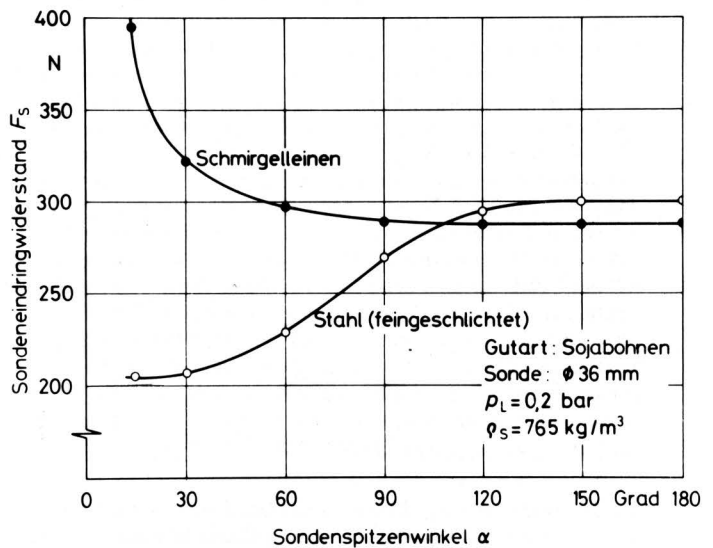


Bild 10. Sondeneindringwiderstand F_s in Abhängigkeit vom Sondenspitzenwinkel α und dessen Oberflächenrauigkeit.

Beim Schmirgelleinen dagegen überwiegt bei relativ spitzen Kegeln der Reibungsanteil, d.h. bei einer Verkleinerung des Spitzenwinkels und damit Vergrößerung der Mantelfläche sind zunehmend größere Eindringwiderstände zu überwinden. Aus praktischen Gründen kommt daher für die spätere Meßsondenausführung nur ein glatter Stahlkegel in Frage.

Zur Berücksichtigung des auftretenden Winkeleinflusses auf den Eindringwiderstand ist in **Bild 11** der für Gl. (2) erforderliche Korrekturfaktor für eine glatte Stahloberfläche dargestellt. Entsprechend der Theorie wurde dieser Faktor auf eine ebene Stirnfläche ($\alpha = 180^\circ$) bezogen.

4.7 Einfluß der Sondiergeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Sondiergeschwindigkeit auf den Eindringwiderstand konnte der Sondenvorschub, wie erwähnt, in 8 Stufen um den Faktor 150 verändert werden. Dieser Geschwindigkeitsbereich dürfte auch beim späteren praktischen Einsatz der Meßsonde wohl kaum über- oder unterschritten werden.

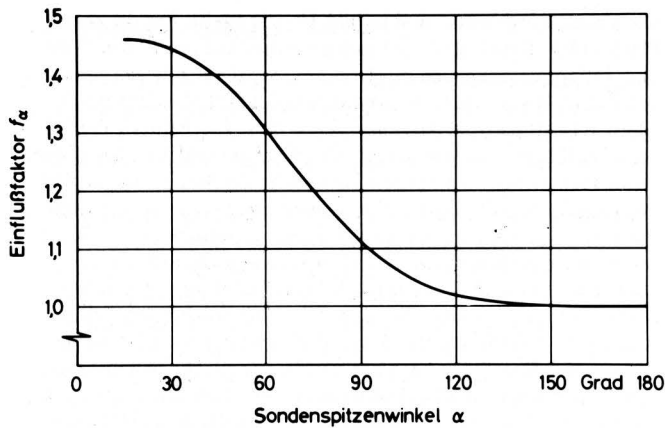


Bild 11. Korrekturfaktor f_α als Funktion des Sondenspitzenwinkels α , feingeschlitteter Stahl.

In Bild 12 sind die jeweils an drei verschiedenen, aber festen Stellen in der Siloachse des Modellbehälters I gemessenen Eindringwiderstände ($\beta = 180^\circ$) aufgetragen. Bei der Auswertung der Sondenmeßschriebe wurde die Zuordnung dort gewählt, wo die mit einer Meßdose nach [11] gemessenen Kurvenverläufe (analog zu Bild 7) die im Diagramm als Parameter eingetragenen Druckspannungswerte aufwiesen. Die logarithmische Aufteilung der Abszisse erlaubt eine bessere Überschaubarkeit der gewählten Geschwindigkeiten. In dem untersuchten Bereich ist eine Erhöhung der Sondiergeschwindigkeit mit einer deutlichen Steigerung des gemessenen Eindringwiderstandes verbunden, die jedoch nahezu unabhängig ist von der im Gut herrschenden Spannung. Es zeigt sich weiterhin, daß die jeweils im gleichen Punkt gemessenen Eindringwiderstände mit guter Näherung auf einer Geraden liegen. Diese Ergebnisse werden auch durch frühere Untersuchungen von Paul [12] im Geschwindigkeitsbereich von 0,6 bis 3,4 cm/s bestätigt. Eine Schrifttumsdurchsicht von bodenmechanischen Sondierungen läßt hingegen keine eindeutige Tendenz erkennen; je nach untersuchter Bodenart wurde entweder kein oder ein mehr oder weniger bedeutender Einfluß der Geschwindigkeit auf den Eindringwiderstand beobachtet [3].

Bei der mathematischen Erfassung des Geschwindigkeitseinflusses auf den Eindringwiderstand wurde als willkürliche Basis 1 cm/s gewählt. Dieser Wert hat sich sowohl beim Einsatz im Großsilo [2] als auch bei den bisher durchgeführten Untersuchungen am Modellsilo insbesondere bei der Meßwertregistrierung als besonders brauchbar erwiesen. In Bild 13 ist der sich damit aus Bild 12 ergebende und die Sondiergeschwindigkeit berücksichtigende Korrekturfaktor f_v in halblogarithmischer Aufteilung dargestellt.

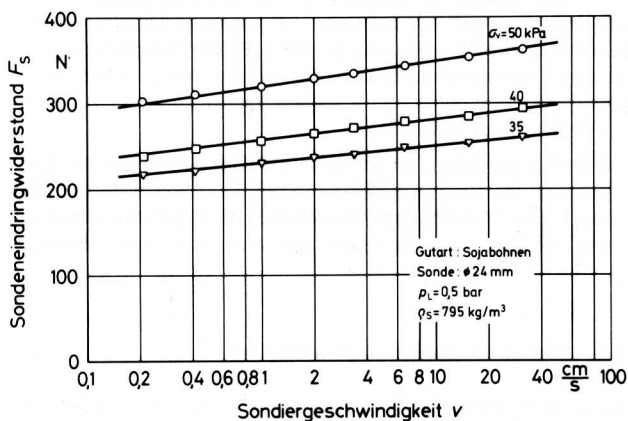


Bild 12. Sondeneindringwiderstand F_S in Abhängigkeit von der Sondiergeschwindigkeit v .

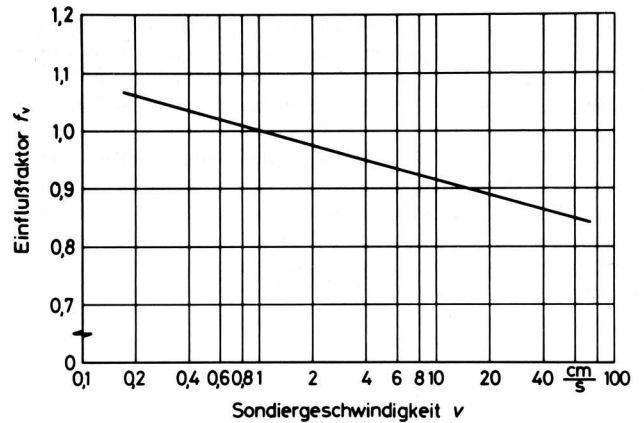


Bild 13. Korrekturfaktor f_v als Funktion der Sondiergeschwindigkeit v .

4.8 Einfluß der Schüttdichte

In einer Schüttung werden die Körner durch Druck- und Reibkräfte an den Berührungsstellen mit den Nachbarkörnern festgehalten. Solange dabei genügend Berührungspunkte vorhanden sind, ist jede beliebige Lagerung denkbar. Je lockerer die Lagerung ist, desto kleiner ist auch die Zahl der Berührungspunkte je Volumeneinheit. Infolgedessen ist auch die Stabilität eines Kornverbandes bei lockerer Lagerung geringer als bei dichter Lagerung. Unter sonst gleichen Bedingungen, d.h. insbesondere unter Beibehaltung einer konstanten Druckspannung im Gut wird dadurch auch beispielsweise der Eindringwiderstand einer Sonde ganz erheblich beeinflusst, was bei fast allen bodenmechanischen Veröffentlichungen auf diesem Gebiet immer wieder betont wird (z.B. [5, 6, 7, 13]).

Unterschiedliche Füllverfahren können zu sehr unterschiedlichen Schüttdichten und damit zu einem unterschiedlichen Hohlraumvolumen im Silo führen [3]. Bei der Untersuchung des zu erwartenden Einflusses der Schüttdichte auf den Eindringwiderstand der Meßsonde zeigte sich bei Sondenuntersuchungen in Sand, daß der Eindringwiderstand bei gleicher Druckspannung im Gut außerordentlich stark mit der Schüttdichte ansteigt, siehe auch Bild 5a. Durch die Auswertung zahlreicher an Sojabohnen-Schüttungen durchgeführter Messungen konnte festgestellt werden, daß der Eindringwiderstand F_S sich umgekehrt proportional verhält zur 6. Potenz des mittleren Hohlraumvolumens ϵ , d.h.

$$F_S \sim 1/\epsilon^6 \quad (9)$$

(Das Hohlraumvolumen ϵ ist definiert als das Verhältnis des Volumens der Poren zum Volumen der gesamten Probe [3].)

Oder bei Betrachtung verschiedener Schüttdichten ρ_s bzw. Hohlraumvolumina ϵ (Index 1 und 2) ist

$$\frac{F_{S,1}}{F_{S,2}} = \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^6 \quad (10)$$

Diese Beziehung hat für alle in Abschn. 4.5 aufgeführten Sonden-durchmesser und eine Sojabohnen-Schüttung in dem untersuchten und in der Praxis vorwiegend auftretenden Bereich von $\epsilon = 0,32$ bis 0,37 Gültigkeit.

Aufgrund des sehr starken Einflusses der Schüttdichte wäre für einen erfolgreichen Einsatz dieses einfachen Spitzendruck-Sondierverfahrens für jede Schüttdichte eines Silos, die darüber hinaus sogar örtlich sehr unterschiedlich und daher in der Regel unbekannt ist, jeweils ein anderes Kalibrierdiagramm — wie in [2] erläutert — zur Ermittlung der örtlichen Druckspannungen im Silo erforderlich.

Bekanntlich steht aber der innere Reibungswinkel des Schüttgutes in direktem Zusammenhang mit der örtlichen Schüttdichte (z.B. [10, 14–17]); man kann also über die Messung des Reibungswinkels die Schüttdichte berücksichtigen. Aus diesem Grunde wurde

versucht, die Meßsonde so weiterzuentwickeln, daß sie neben dem Eindringwiderstand F_S auch näherungsweise den inneren Reibungswinkel φ mißt. Durch eine entsprechende rechnerische Berücksichtigung dieser Größe kann dann deren störender Einfluß auf den gemessenen Eindringwiderstand der Sonde und damit auf die richtige Ermittlung der tatsächlichen Spannungswerte im Schüttgut ausgeschaltet werden. Daraus ergab sich dann die 3-Komponenten-Meßsonde, die in [4] vorgestellt werden soll.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das bisher vor allem bei bodenmechanischen Tragfähigkeitsuntersuchungen eingesetzte Spitzendruck-Sondierverfahren wurde für Druckspannungsmessungen an Schüttgut-Silos weiterentwickelt. Über die Messung der örtlichen Eindringwiderstände kann eine Aussage über die Druckspannungsverteilung im Silo gemacht werden.

Für den praktischen Einsatz dieses neuen Meßverfahrens war es erforderlich, den Einfluß versuchstechnischer und baulich bedingter Größen der Sonde näher zu erforschen. Dazu wurde zunächst der örtliche Einflußbereich vor und neben der Sondenspitze näher untersucht, und zwar einerseits im Hinblick auf die Allgemeingültigkeit der Meßwerte insbesondere bei der Anwendung im Modellsilo (Störung durch Wandeinfluß) sowie andererseits im Hinblick auf eine optimale Ausbildung des Sondenkörpers vor allem bei der Anwendung im Großsilo (Reduzierung der Sondenantriebskräfte). Weiterhin standen dabei die Sondenparameter wie Sondierrichtung, Sondiergeschwindigkeit, Sondenspitzen Durchmesser sowie Kegelswinkel und Oberflächenrauigkeit der Sondenspitze im Vordergrund.

Darüber hinaus zeigte sich bei diesen Versuchen sehr deutlich, daß auch die Schüttdichte im Silo einen großen Einfluß auf den Eindringwiderstand und damit auf das Meßergebnis bei gleichbleibender örtlicher Ruhedruckspannung hat. Neuere Untersuchungen der Bodenmechanik, der Haufwerksmechanik und der Landtechnik bestätigen [15, 18], daß u.a. die jeweilige Schüttdichte erhebliche Auswirkungen auf den inneren Reibungswinkel des Schüttgutes hat und damit also auch die Fließvorgänge um die Sonde herum beeinflußt.

Diese Überlegung, daß letztlich nur die genaue Kenntnis über das örtliche Reibverhalten des eingelagerten Schüttgutes es möglich macht, über den Eindringwiderstand der Sonde die vorher dort herrschenden Druckspannungen ermitteln zu können, führte zu der Entwicklung einer 3-Komponenten-Meßsonde, die in [4] vorgestellt werden soll.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Hesse, Th.: Das Spitzendrucksondieren – Ein Meßverfahren zur Bestimmung der Druckverteilung in einem Schüttgut-Silo. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 3, S. 73/78.
- [2] Hesse, Th. u. W. Borß: Einsatz einer Spitzendrucksonde im Großsilo. Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 1, S. 13/17.
- [3] Hesse, Th.: Zur Entwicklung eines Meßverfahrens für die Ermittlung der Spannungsverteilung in Schüttgut-Silos. Diss. TU Braunschweig 1978, VDI-Fortschr.-Ber. Reihe 14, Nr. 20.
- [4] Hesse, Th.: Erweitertes Spitzendruck-Sondierverfahren zur Messung der Druckspannungen in Schüttgut-Silos. Erscheint demnächst in Grundl. Landtechnik
- [5] DIN 4094 Blatt 2 (Vornorm Juni 1965): Baugrund; Ramm- und Drucksondiergeräte, Hinweise für die Anwendung.
- [6] Melzer, K.-J.: Sondenuntersuchungen in Sand. Mitt. Inst. Verkehrswasserb. Grundb. u. Bodenmech. TH Aachen, Nr. 43 (1968).
- [7] Weiß, K.: Neuere Erkenntnisse mit der Spitzendrucksonde. Vorträge d. Baugrundtagung, Berlin 1964, S. 227/66.
- [8] • Naujoks, L.: Über die Tragfähigkeit von mittig, vertikal belasteten Flachgründungen im Sand. "Flachgründungen". Berlin: Verlag W. Ernst und Sohn 1963.
- [9] Franke, E.: Großbohrpfähle. Vorträge d. Baugrundtagung, Düsseldorf 1970, S. 167/95.
- [10] DIN 4017 Blatt 1 (Sept. 1974): Baugrund; Grundbruchrechnungen von lotrecht mittig belasteten Flachgründungen.
- [11] Hesse, Th.: Druckspannungsmeßdosen für körnige Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 5, S. 121/31.
- [12] Paul, J.: Spannungsverteilungen in körnigen kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagerung in Behältern. Diss. TU Braunschweig 1974, Forsch.-Bericht Agrartechnik des Arb.-kreises Forschung und Lehre der MEG (1975) H. 11.
- [13] Zweck, H.: Probleme bei der Auswertung von Ramm- und Drucksondierungen. Bautechnik Bd. 45 (1968) Nr. 3, S. 73/78.
- [14] Beer, E. de: Neuere Erkenntnisse über den Bruchwiderstand kohäsionsloser Böden unter Flachgründungen. Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmech. H. 25, TH Aachen 1962, S. 265/99.
- [15] Hesse, Th. u. O.-H. Hoffmann: Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 6, S. 205/13.
- [16] Schultze, E.: Der Reibungswinkel nichtbindiger Böden. Der Bauingenieur Bd. 43 (1968) Nr. 9, S. 313/20.
- [17] Teferra, A.: Abhängigkeit des inneren Reibungswinkels nichtbindiger Böden von einfachen Bodenkennwerten. Straße-Brücke-Tunnel Bd. 27 (1975) Nr. 8, S. 203/207.
- [18] Hoffmann, O.-H.: Neuere Grundlagen der Mechanik körniger Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 48/59.