

### Das Spitzendrucksondieren – Ein Meßverfahren zur Bestimmung der Druckverteilung in einem Schüttgut-Silo

Von Theodor Hesse, Braunschweig\*)

DK 621.642.3:531.787:531.223

Die DIN 1055 Blatt 6 (Lasten in Silozellen) stellt keine zuverlässige Dimensionierungsgrundlage für Schüttgut-Silos dar. Voraussetzung für eine richtige Dimensionierung ist die Kenntnis der an der Wand bzw. im Gut wirkenden Drücke. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, mit einer Spitzendrucksonde, die Druckverteilung im Silo zu messen. Es werden die Zusammenhänge dargelegt, die für den erfolgreichen Einsatz des Verfahrens zu beachten sind.

#### 1. Einleitung

Bei Schüttgütern hat sich im Gegensatz zu Flüssigkeiten und Gasen bisher noch keine einheitliche Theorie für das Verhalten in Vorratsbehältern und für das Ausfließen aus diesen Behältern durchsetzen können. Bekanntlich bauen sich im Schüttgut nicht nur Drücke bzw. Druckspannungen auf, sondern auch Schubspannungen. Entsprechende Druck- und Schubkräfte werden vom Schüttgut als Belastungen auf die Behälterwände und den Behälterboden übertragen und müssen von diesen aufgenommen werden.

In Anlehnung an DIN 1055 Blatt 6 [1] sind in Bild 1 links die auf die Silowand gerichtete horizontale Druckbelastung  $\sigma_h$  und die infolge der Reibung zwischen Wand und Schüttgut dort in vertikaler Richtung angreifende Schubbelastung  $\tau_w$  sowie die vertikal gerichtete und schließlich auch am Boden wirkende Druckbelastung  $\sigma_v$  eingezeichnet. In dem rechts dargestellten Diagramm sind diese Belastungsgrößen in Abhängigkeit von der Silotiefe aufgetragen.

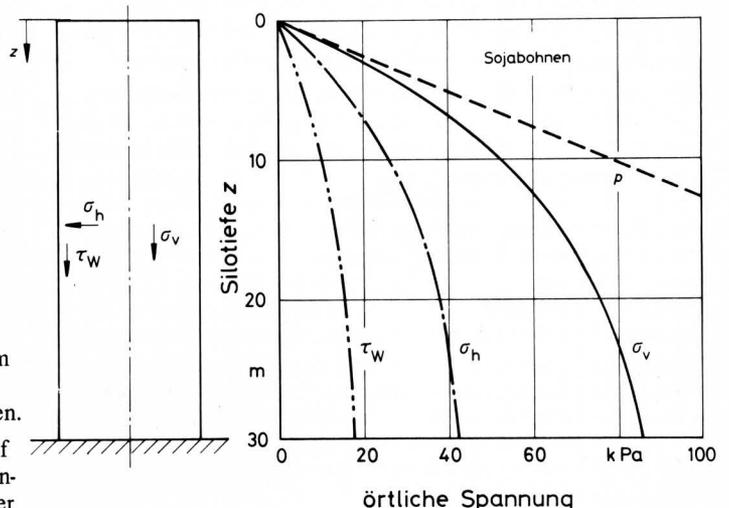


Bild 1. Spannungsverläufe in einem Silo von 10 m Durchmesser in Abhängigkeit von der Silotiefe  $z$  nach DIN 1055 Blatt 6 für ein Schüttgut mit einer Schüttdichte  $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$  und einem inneren Reibungswinkel  $\varphi = 30^\circ$ .

$\sigma_v$  vertikale Druckbelastung  
 $\sigma_h$  horizontale Druckbelastung  
 $\tau_w$  Schubbelastung an der Wand  
 $p$  hydrostatischer Druck einer vergleichbaren Flüssigkeit

\*) Dipl.-Ing. Theodor Hesse ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig.

Es ist bekannt, daß der Druck in einer Flüssigkeit sich einerseits gleichmäßig nach allen Seiten ausbreitet und daß er andererseits linear mit der Tiefe zunimmt (Kurve p). Die vertikale Druckspannung bzw. -belastung eines Schüttgutes kann je nach innerem Reibungswinkel mehr als das Doppelte der horizontalen Druckspannung erreichen. Aus dem Diagramm erkennt man, daß die Zunahme der beiden Druckbelastungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  und der Schubbelastung  $\tau_w$  an der Wand im Gegensatz zu einer Flüssigkeit mit wachsender Tiefe allmählich abnimmt, so daß alle drei Kurven sich Grenzwerten nähern, die auch bei sehr großen Silotiefen nicht überschritten werden. Diese als Siloeffekt bezeichnete Erscheinung läßt sich dadurch erklären, daß das Schüttgut infolge Brückenbildung einen Teil des Eigengewichtes über Reibkräfte in die Wände abstützt. Die maximal erreichbare Belastung ist außer von der Wandrauigkeit und der Gutart lediglich von den Siloabmessungen abhängig; je kleiner das Verhältnis von Silodurchmesser zu Silohöhe ist, desto eher wird ein Grenzwert erreicht.

Für eine festigkeitsgerechte Dimensionierung von Schüttgut-Silos steht z.Z. die DIN 1055 Blatt 6 [1] zur Verfügung; die Verfasser dieser Berechnungsgrundlagen weisen aber ausdrücklich darauf hin, daß diese Unterlagen für die Berechnung von Silos und für die Voraussagen des Verhaltens von Silos bei weitem noch nicht ausreichen [2]. Die Unkenntnis der Spannungsverteilung, insbesondere beim Entleeren, hat auch in neuerer Zeit immer wieder zu Schadensfällen an Silos geführt.

Eine optimale Silodimensionierung setzt richtige Lastannahmen für die unterschiedlichen Schüttgüter voraus. Die am Silo auftretenden Belastungen sind zurückzuführen auf die Spannungsverteilung im Schüttgut. Daher wurde am Institut für Landmaschinen der Technischen Universität Braunschweig — ausgehend von Drucksonden auf dem Gebiet der Bodenmechanik, z.B. in [3] — eine Meßsonde entwickelt, die in das Schüttgut eingefahren wird und dabei eine Bestimmung der Druckspannungsverteilung im Silo ermöglicht [4].

Bisher konnten die am Silo auftretenden Belastungen lediglich durch an der Wand und am Boden eingebaute Meßdosen örtlich bestimmt werden. Darüber hinaus wäre es theoretisch möglich, durch Einlegen von geeigneten Meßdosen punktweise durch eine Vielzahl von gleichartigen Versuchen und durch Interpolation dieser Werte die Spannungsverteilung im Silo für verschiedene Schüttgüter zu ermitteln. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen könnten solche Untersuchungen aber lediglich an Modellsilos durchgeführt werden; die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse und ihre Übertragbarkeit auf Großsilos ist nicht immer gesichert.

Mit dem neuen Sondierverfahren können nun erstmalig Messungen in Modellsilos und in Großsilos durchgeführt werden. Bei diesem Spitzendruck-Sondierverfahren wird der Eindringwiderstand der Sondenspitze gemessen und daraus die vor dem Sondiervorgang im Schüttgut herrschende Druckspannungsverteilung errechnet. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, den örtlichen Druck kontinuierlich während des gesamten Sondierweges — also auch mit etwaigen örtlichen Anstiegen oder Abfällen — zu ermitteln. Der Vorteil des neuen Sondierverfahrens gegenüber den bisher üblichen Messungen an Wand und Boden oder mit eingelegten Meßdosen besteht darin, daß man erstmalig einen Einblick in die Druckverteilung über den gesamten Querschnitt bzw. die volle Höhe einer Schüttung erhält und daß man auf wesentlich einfachere und billigere Weise als bisher Messungen an Silos durchführen und damit die Voraussetzungen für eine optimale Gestaltung von Silos schaffen kann.

## 2. Theoretische und versuchstechnische Grundlagen für das Sondierverfahren

Mit Hilfe des Spitzendruck-Sondierverfahrens sollen die vor dem Sondieren im Schüttgut vorhandenen örtlichen Ruhedruckspannungen ermittelt werden. Im folgenden wird in Anlehnung an die

Bodenmechanik, auf die die Haufwerksmechanik häufig zurückgreift, kurz der theoretische Zusammenhang zwischen der Ruhedruckspannung und dem Eindringwiderstand der Sondenspitze dargelegt. Da der Eindringwiderstand zusätzlich vom inneren Reibungswinkel des Gutes abhängig ist, muß dieser für eine genaue Bestimmung des Druckes ebenfalls ermittelt werden.

Die Vielzahl der Einflüsse auf die Spannungs- und Verformungszustände vor der Sondenspitze und damit auf den Sondiervorgang macht eine Analyse erforderlich. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Eindringwiderstand einer Sonde unter statischer Beanspruchung mit der Bruchlast eines Pfahles zu vergleichen ist, Bild 2.

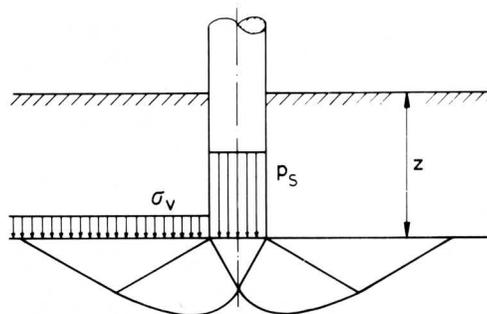


Bild 2. Grundbruch, Druckspannungen und Gleitlinien im Boden bei Belastung eines Pfahles.

$P_S = P_S/F$  sich aus der maximalen Belastung  $P_S$  auf die ebene Stirnfläche  $F$  ergebende mittlere Druckbelastung  
 $\sigma_v$  infolge der Erdlast auftretende vertikale Ruhedruckspannung  
 $z$  Eindringtiefe

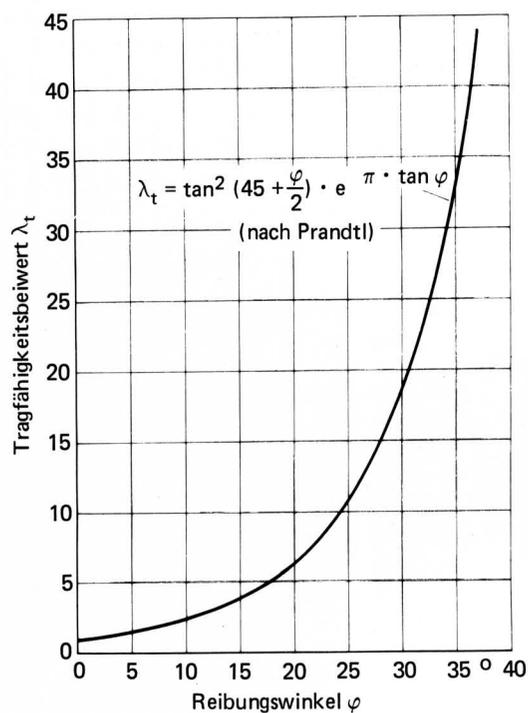


Bild 3. Tragfähigkeitsbeiwert  $\lambda_t$  als Funktion des inneren Reibungswinkels  $\varphi$ .

Die Tragfähigkeit oder Grenzlast eines Pfahles bzw. der Sondeneindringwiderstand  $P_S$  kann für einen kohäsionslosen Boden in Anlehnung an DIN 4017 Blatt 1 [5], die sich u.a. auf theoretische Untersuchungen von *Prandtl* [6] stützt, mit hinreichender Genauigkeit durch folgende Grundbruchgleichung berechnet werden:

$$P_S = F \cdot \sigma_v \cdot \lambda_t \cdot \nu_t \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- F die Sondenquerschnittsfläche,
- $\sigma_v$  die infolge des Guteigengewichtes in der Tiefe z herrschende vertikale Ruhedruckspannung
- $\lambda_t$  Tragfähigkeitsbeiwert (Funktion des inneren Reibungswinkels  $\varphi$ , siehe Bild 3)
- $\nu_t$  Formbeiwert (für Kreisquerschnitt:  $\nu_t = 1 + \sin \varphi$ ).

Unter der Voraussetzung der Übertragbarkeit auf ein kohäsionsloses Schüttgut im Silo und nach Einführung von  $p_S$  für den auf die Sondenquerschnittsfläche F bezogenen Sondeneindringwiderstand  $P_S$  kann die gesuchte, vor dem Sondieren im Silo vorhandene örtliche vertikale Ruhedruckspannung bestimmt werden:

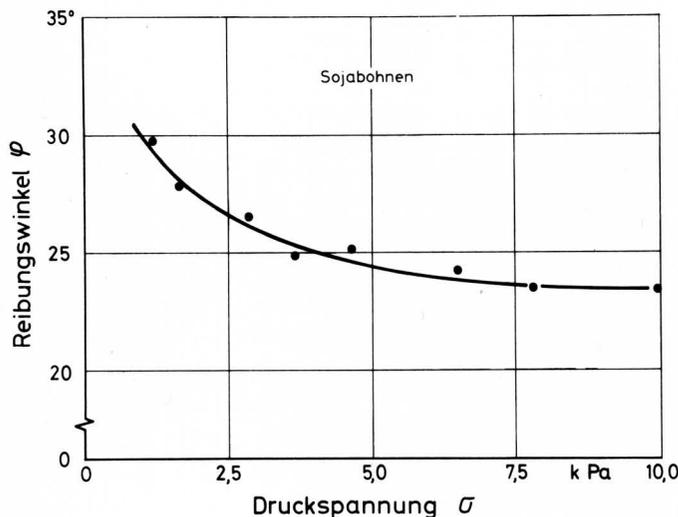
$$\sigma_v = p_S \cdot \frac{1}{\lambda_t \cdot \nu_t} \quad (2)$$

In **Bild 3** ist der Tragfähigkeitsbeiwert  $\lambda_t$  als stark abhängige Funktion des inneren Reibungswinkels  $\varphi$  des Schüttgutes aufgetragen.

Aus neueren Untersuchungen der Bodenmechanik mit Sanden und aus Versuchen am hiesigen Institut mit landwirtschaftlichen Schüttgütern geht hervor, daß der innere Reibungswinkel für ein bestimmtes Schüttgut keinen konstanten Wert aufweist, sondern daß er bei einer geringen Belastung, **Bild 4**, höhere Werte annimmt als bei größerer Belastung, wo er einem Grenzwert zustrebt [4]. Zu bemerken ist, daß der innere Reibungswinkel mit einem Ringschergerät ermittelt wurde; aus dem Quotienten der in der Scherfläche ermittelten Schubspannung  $\tau_S$  und Druckspannung  $\sigma_S$  läßt sich der innere Reibungswinkel des Gutes bestimmen:

$$\varphi = \arctan \frac{\tau_S}{\sigma_S} \quad (3)$$

Aus der Bodenmechanik ist bekannt, daß der innere Reibungswinkel empfindlich abhängig ist von der Lagerungsdichte des Gutes. Für Sand z.B. gilt annähernd, daß sich der Reibungswinkel um 1° erhöht, wenn der Porenanteil um 2 % abnimmt [7].



**Bild 4.** Reibungswinkel  $\varphi$  für Sojabohnen als Funktion der Druckspannung.

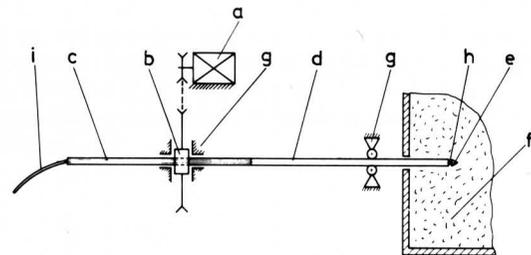
Aus diesen Beziehungen erkennt man, daß es für eine genaue Festlegung des örtlichen Tragfähigkeitsbeiwertes  $\lambda_t$  und des Formbeiwertes  $\nu_t$  unumgänglich ist, besonderen Wert auf die Ermittlung des jeweiligen inneren Reibungswinkels  $\varphi$  zu legen, um mit dem Sondierverfahren eine exakte Druckverteilung in einer Schüttung bestimmen zu können.

### 3. Aufbau und Funktion der entwickelten Versuchseinrichtung

Um eine klare Zuordnung von Eindringwiderstand der Sondenspitze und örtlicher Druckspannung im Silo zu erhalten, werden zunächst mit einer geeigneten Versuchseinrichtung die Sondeneindringwiderstände an bestimmten Stellen im Silo gemessen und danach nach Herstellung der gleichen Schüttungen an denselben Stellen mit einer speziell entwickelten Druckmeßdose die Druckspannungen.

#### 3.1 Spitzendrucksonde

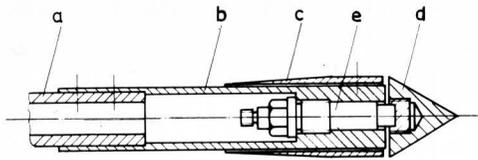
Der Aufbau der Sondiereinrichtung für Modellsilos ist in **Bild 5** schematisch wiedergegeben. Die Sonde wird kontinuierlich durch das im Behälter lagernde Gut gedrückt. Ihr Antrieb erfolgt von einem Elektromotor a über einen Riementrieb auf eine axial feste Gewindemutter b, die über eine Spindel c den Vorschub des Sondenrohres d mit der aufgesetzten Sondenspitze e bewirkt. Der an der Sondenspitze auftretende Eindringwiderstand wird mit Hilfe eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers h mit nachgeschaltetem Ladungsverstärker auf einem X,Y-Schreiber über dem Eindringweg aufgetragen. Mit der vor oder unter dem Modellsilo stehenden Sondiereinrichtung kann durch entsprechende Bohrungen im Behälter horizontal in verschiedenen Höhen oder vertikal in beliebigen Wandabständen in das Schüttgut hineingefahren werden.



**Bild 5.** Spitzendrucksonde mit Antrieb.

- |                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| a Elektromotor            | g Führung                            |
| b Gewindemutter           | h piezoelektrischer Kraftaufnehmer   |
| c Spindel                 | i Verbindungskabel zum Meßverstärker |
| d Sondenrohr              |                                      |
| e Sondenspitze            |                                      |
| f Modellsilo m. Schüttgut |                                      |

Der Aufbau der Sondenspitze, **Bild 6**, macht es möglich, einerseits verschiedene Kegelwinkel zu untersuchen, andererseits auch den Kegeldurchmesser zu verändern. Auf das Ende des Sondenrohres a ist ein Anschlußstück b mit einem eingebauten piezoelektrischen Kraftaufnehmer e aufgesetzt. Die auf den Aufnehmer aufgeschraubte Kegelspitze d ruft beim Eindringen in das Schüttgut Ladungsänderungen am Quarz hervor, die über eine gutisolierte Leitung (hier nicht eingezeichnet) und mit Hilfe eines angeschlossenen Ladungsverstärkers eine direkte Kraftzuordnung ermöglichen. Ein aufgeschobenes Übergangsstück c gleicht den Durchmesserunterschied zwischen dem jeweiligen Kegel und dem Schaft allmählich aus. Der für bodenmechanische Sondierungen übliche Kegelspitzenwinkel von 60° wurde zunächst auch für die Siloversuche eingesetzt. Der Kegeldurchmesser beträgt in diesem Fall 24 mm.

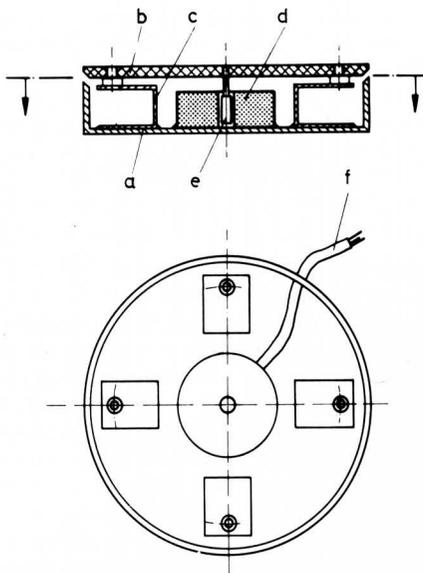


**Bild 6.** Aufbau des Sondenkörpers. (Durchmesser 24 mm, Spitzenwinkel 60°)

- |                  |  |
|------------------|--|
| a Sondenrohr     | d Sondenspitze   |
| b Anschlußstück  | e piezoelektrischer Kraftaufnehmer mit Stecker für Kabelanschluß |
| c Übergangsstück |  |

### 3.2 Druckmeßdose

Zur direkten Kontrollmessung der örtlichen Ruhedruckspannung im Silo wurde die in **Bild 7** dargestellte Druckmeßdose entwickelt. Sie besteht im wesentlichen aus einem flachen dünnwandigen zylindrischen Gehäuse a, dessen Deckel b auf 4 U-förmig gebogenen Blattfedern c auf dem Gehäuseboden aufgesetzt ist. Bei einer axialen Druckbelastung der Meßdose lassen die relativ steifen Federn eine geringe Verschiebung des Deckels zu, welche induktiv ermittelt und aufgrund der linearen Federkennlinie direkt der entsprechenden Belastung zugeordnet werden kann. Die Federsteifigkeit ist so groß gewählt, daß sie in dem untersuchten Druckbereich in erster Näherung der Elastizität bzw. der vertikalen Nachgiebigkeit einer gleichhohen Schüttgutschicht entspricht, um den Störkörpereinfluß der Meßdose im Schüttgut so gering wie möglich zu halten. Nachdem der Modellsilo bis zur beabsichtigten Meßhöhe gefüllt ist, kann die Dose mit dem zugehörigen Anschlußkabel eingelegt werden. Beim weiteren Füllen wird die auf die Meßplatte wirkende Druckbelastung auf ein Registriergerät übertragen.



**Bild 7.** Druckspannungmeßdose (Durchmesser 76 mm)

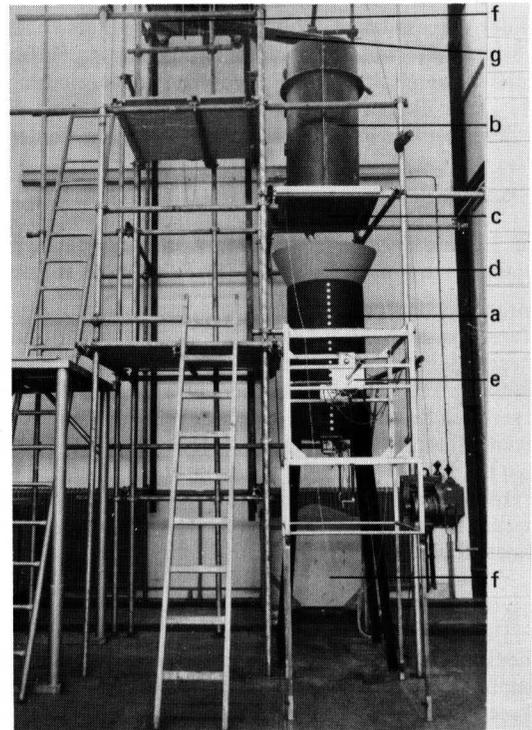
- |               |                  |
|---------------|------------------|
| a Gehäuse     | d Spule          |
| b Deckel      | e Weicheisenkern |
| c Blattfedern | f Anschlußkabel  |

### 3.3 Gesamter Versuchsstand

**Bild 8** gibt einen Überblick über den Siloversuchsstand. Der zylindrische Modellsilo a aus Stahl hat einen Innendurchmesser von 600 mm, eine Höhe von 1200 oder wahlweise 3000 mm und, um alle störenden Einflüsse durch ein elastisches Nachgeben der Wand auszuschalten, eine Wandstärke von 10 mm.

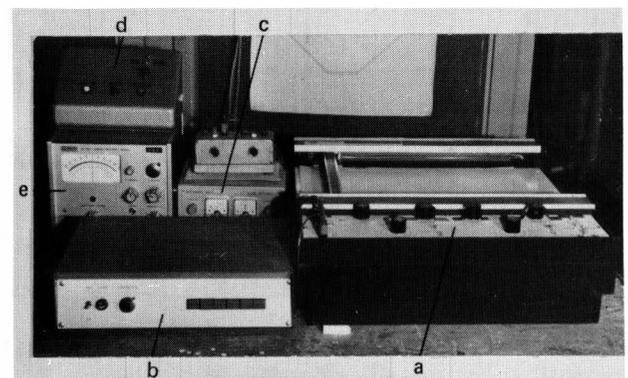
Er wird aus einem darüber angebrachten, von einem separaten Gerüst getragenen Füllbehälter b gefüllt. Vor dem Modellsilo steht die Sondiereinrichtung e, mit der horizontal in verschiedenen Höhen oder auch — bei entsprechender Anordnung — vertikal in beliebigen Wandabständen in die Schüttung eingefahren werden kann. Nach Beendigung der Messung fließt das Gut über eine Rutsche in einen Vorratsbehälter f ab, der über eine Seilwinde hochgezogen wird, damit das Schüttgut ohne größere Beschädigungen erneut von oben in den Füllbehälter gefüllt werden kann.

**Bild 9** zeigt die elektronischen Meß- und Steuergeräte, die wegen des anfallenden Staubes in einem separaten Raum untergebracht sind.



**Bild 8.** Versuchsstand.

- |                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| a Modellsilo      | e Sondiereinrichtung |
| b Füllbehälter    | f Vorratsbehälter    |
| c Klappenboden    | g Zulaufrohr         |
| d Trichteraufsatz |                      |



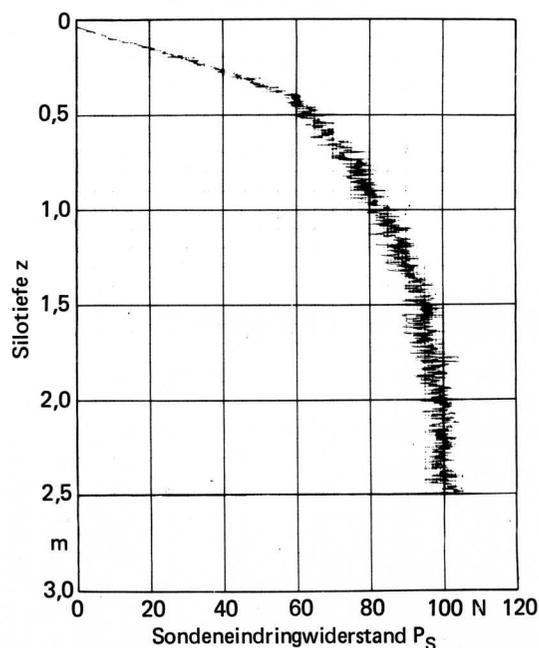
**Bild 9.** Elektronische Meß- und Steuergeräte für die Messung des Sondereindringwiderstands und die direkte Druckspannungsmessung.

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| a X,Y-Schreiber       | d Schalterpult für Steuerung der Sonde |
| b Ladungsverstärker   | e Trägerfrequenzverstärker             |
| c Spannungsversorgung |  |

#### 4. Bisherige Untersuchungen

Mit den dargestellten Meßeinrichtungen konnte der Zusammenhang zwischen dem Ruhedruck im Silo vor dem Eindringen der Sonde und dem Eindringwiderstand der Sonde experimentell ermittelt werden.

**Bild 10** gibt einen Meßschrieb wieder, in dem für das vertikale Sondieren in Silomitte der Eindringwiderstand der Sondenspitze als Funktion der Silotiefe aufgetragen ist. Der Modellsilo hat einen Durchmesser von 60 cm, eine Höhe von 3 m und ist mit Sojabohnen gefüllt. Der bereits eingangs erläuterte Siloeffekt — die Tatsache, daß sich die Spannungen im Schüttgut bei großen Silotiefen asymptotisch einem Grenzwert nähern — ist besonders deutlich auf diesem Meßschrieb zu erkennen.



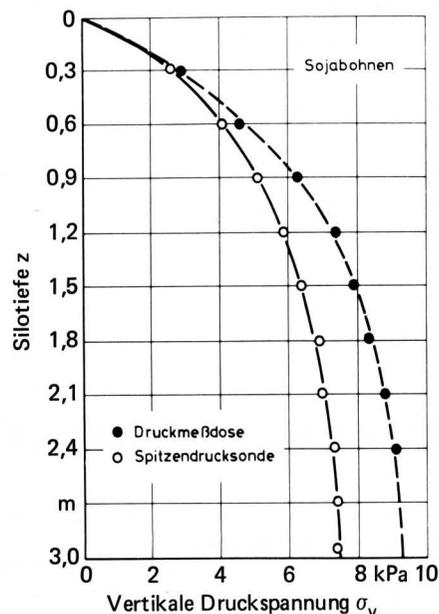
**Bild 10.** Beispiel eines Meßschriebes: Eindringwiderstand in Abhängigkeit von der Silotiefe  $z$ . Silodurchmesser: 600 mm, vertikales Sondieren von oben in Silomitte.

In **Bild 11** sind die aus den Sondenmeßwerten mit Hilfe der oben angeführten Gleichung (2) ermittelten Ruhedruckspannungen vor dem Sondieren den mit der separat eingelegten Druckmeßdose gemessenen Druckspannungen gegenübergestellt. Beide Kurven zeigen die gleiche Tendenz, im Betrag jedoch liegen die über das Sondierverfahren ermittelten Werte etwas unter den mit Hilfe der Druckmeßdose direkt gemessenen Druckspannungen; die Differenz von max. 17 % hat insbesondere folgende Gründe:

1. Die für die Berechnung verwendete Formel geht von einem "ebenen Fundament" aus, bei den Versuchen wurde aber die bei Sondierungen in der Bodenmechanik übliche  $60^\circ$ -Spitze verwendet. Erste Versuche haben die Erwartung bestätigt, daß diese Spitze gegenüber einer stumpfen geringere Eindringwiderstände erfährt, was die hier zu niedrig errechneten Drücke erklären könnte.
2. Der Tragfähigkeitsbeiwert  $\lambda_t$  ist eine vom inneren Reibungswinkel stark abhängige Größe (s. Bild 3); der Formbeiwert  $\nu_t$  ist nach neueren Untersuchungen der Bodenmechanik (siehe auch DIN 4017 [5]) ebenfalls vom Reibungswinkel abhängig. Für die bisherigen Berechnungen wurde der innere Reibungswinkel in separaten Labor-Scherversuchen gewonnen und auf

die Lagerung im Silo übertragen. Eine direkte Messung des inneren Reibungswinkels in Sondennähe bzw. an der Sonde würde die örtliche Dichte berücksichtigen und wesentlich genauere Werte für  $\lambda_t$  und  $\nu_t$  liefern. Der Bau einer solchen Sonde ist geplant.

Trotz dieser und anderer noch zu klärenden Faktoren eröffnet die qualitative Übereinstimmung beider Kurven in **Bild 11** sehr gute Aussichten für einen erfolgreichen Ausbau dieser Methode der indirekten Druckspannungsmessung.



**Bild 11.** Vergleich der direkt mit der Meßdose gemessenen und den nach Gl. (2) bestimmten Druckspannungen  $\sigma_v$  für verschiedene Silotiefen  $z$ . Silodurchmesser: 600 mm, vertikales Sondieren von oben in Silomitte.

#### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Das aus der Bodenmechanik bekannte Spitzendruck-Sondierverfahren wurde für Druckspannungsmessungen in Silos weiterentwickelt. In Anlehnung an DIN 4017 Blatt 1 wurde eine Formel entwickelt, die über die Messung des Eindringwiderstandes die Errechnung der vor dem Sondieren in Silos vorhandenen Druckspannungen erlaubt. Durch Einlegen einer hierzu entwickelten Druckmeßdose in das Schüttgut war es möglich, die errechneten Werte zu überprüfen. Die ersten Messungen zeigen in der Tendenz eine gute Übereinstimmung der aus den Sondenversuchen errechneten mit den direkt im Gut gemessenen Druckspannungen.

Um den praktischen Einsatz des Spitzendruck-Sondierverfahrens für eine genaue Bestimmung der Druckspannungen in Silos unter den verschiedensten Bedingungen sicherzustellen, ist eine genaue Kenntnis über das Reibverhalten der dort eingelagerten Schüttgüter erforderlich. Daher ist der Bau einer Sonde geplant, mit der außer dem Eindringwiderstand der Spitze gleichzeitig der örtliche innere Reibungswinkel des Schüttgutes gemessen werden kann.

Eingangs wurde darauf hingewiesen, daß mit Hilfe des neuen Spitzendruck-Sondierverfahrens in größerem Rahmen Druckspannungsmessungen im Großsilo möglich sind.

Über den Einsatz der Sonde in einem Großsilo mit den ersten bereits vorliegenden Versuchsergebnissen soll daher in einem weiteren Aufsatz berichtet werden.

## Verwendete Formelzeichen

$F$	Sondenquerschnittsfläche
$P_S$	Eindringwiderstand der Sondenspitze
$p$	hydrostatischer Druck einer Flüssigkeit
$p_S$	auf die Sondenquerschnittsfläche bezogener Eindringwiderstand der Sondenspitze
$z$	Silotiefe bzw. Eindringtiefe der Sonde
$\lambda_t$	Tragfähigkeitsbeiwert
$\nu_t$	Formbeiwert
$\rho$	Schüttdichte
$\varphi$	innere Reibungswinkel
$\sigma_S$	Druckspannung in der Scherfläche
$\sigma_h$	horizontale Druckspannung bzw. -belastung
$\sigma_v$	vertikale Druckspannung bzw. -belastung
$\tau_S$	Schubspannung in der Scherfläche
$\tau_W$	vertikale Schubbelastung an der Wand

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] DIN 1055 Blatt 6: Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen.
- [ 2 ] •Pieper, K. u. F. Wenzel: Druckverhältnisse in Silozellen. Berlin/München: Verl. W. Ernst u. Sohn, 1964.
- [ 3 ] Melzer, K.-J.: Sondenuntersuchungen in Sand. Diss. TH Aachen 1967.
- [ 4 ] Paul, J.: Spannungsverteilung in körnigen, kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagerung in Behältern. Diss. TU Braunschweig 1975.
- [ 5 ] DIN 4017 Blatt 1: Baugrundberechnungen.
- [ 6 ] Prandtl, L.: Über die Härte plastischer Körper. Nachr. Ges. der Wissenschaften 1920, S. 74/85.
- [ 7 ] •Kezdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik Band I; Bodenphysik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1969.

# Schwingungseigenschaften eines aktivgefederten Schleppersitzes

Von Heiko Helms, Braunschweig\*)

DK 631.372:629.11.014

Es wird theoretisch untersucht, wie die Schwingungseigenschaften eines Schleppersitzes verbessert werden können. Dazu wird eine aktive Sitzfederung verwendet und mit der konventionellen Ausführung verglichen. Es stellt sich heraus, daß sowohl die Wahrnehmungsstärke auf dem Sitz als auch der Relativweg zwischen Sitz und Schlepper durch eine aktive Sitzfederung wesentlich verkleinert werden können. Wichtig ist, daß der Sitz stets gleichphasig mit dem Schlepper schwingt.

## 1. Einleitung

Ackerschlepper und Baumaschinen sind sog. ungefederte Fahrzeuge. Bei ihnen findet zwar noch eine Federung durch die Reifen statt, es fehlt aber die bei schnellen Straßenfahrzeugen zwischen Achse und Aufbau befindliche Federung und Dämpfung. Damit sind u.a. die Aufbaubeschleunigungen bedeutend größer als bei gefederten Fahrzeugen. Infolgedessen ist beim ungefederten Fahrzeug eine vergleichsweise aufwendige Sitzfederung zur Erzielung eines ausreichenden Schwingungskomforts erforderlich. Dieser läßt sich aber mit den üblichen Feder-Dämpfer-Sitzkonstruktionen

nicht beliebig weit verbessern. Hier bietet sich für weitere Verbesserungen eine sog. "aktive" Sitzfederung an [1]. Dabei wird die Abstützung des Sitzes nicht mehr durch Federn und Dämpfer (d.h. konventionell) vorgenommen, sondern z.B. von einem schnell arbeitenden Hydraulikzylinder, wobei diesem seine Fahrbefehle von einem Regler vorgeschrieben werden. Dieses hat derart zu geschehen, daß die Fahrbahnunebenheiten möglichst gut ausgeglichen werden, d.h. daß der Fahrer möglichst wenig beansprucht wird. Als Information könnten dem Regler die am Fußpunkt des Zylinders relativ einfach und billig zu messenden vertikalen Fahrzeugbeschleunigungen bzw. Wege mitgeteilt werden. Für diese Möglichkeit soll der Schwingungskomfort auf einem Ackerschlepper errechnet und mit dem bei konventioneller Sitzfederung verglichen werden. Dabei werden über frühere Arbeiten [2 bis 7] hinaus nicht deterministische, sondern stochastische Fahrbahn-Unebenheiten zugrunde gelegt. Die vorliegende Arbeit wurde dankenswerterweise von der Robert Bosch GmbH, Stuttgart, unterstützt.

## 2. Fahrzeuersatzsystem

Bild 1 zeigt links das sog. Zweimassensystem, auf das als Modell für das System Schlepper-Fahrer alle folgenden Untersuchungen angewendet werden. Die Systemparameter sind  $c_1$ ,  $k_1$ ,  $m_1$  und  $m_2$ . Bei den benutzten Indizes bezieht sich die 2 auf "Fahrergrößen" bzw. Sitzparameter, während die 1 Achsgrößen bezeichnet. Damit ist  $m_2$  die Masse von Fahrer und Sitz,  $m_1$  stellt die anteilige Schleppermasse dar,  $c_1$  und  $k_1$  sind die Reifenfeder- und Dämpferkonstante für die Hinterachse des sonst ungefederten Schleppers. Die Bewegung des Systems wird durch die Straßenunebenheit  $h$  verursacht, die Auswirkungen dieser Störung seien durch die vertikalen Verschiebungen  $z_1$  und  $z_2$  erfaßt.

\*) Dr.-Ing. Heiko Helms ist Oberingenieur am Institut für Fahrzeugtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. M. Mitschke) der TU Braunschweig.